ESTUDO DO EFEITO SINERGÉTICO DA DEGRADAÇÃO POR PUNÇOAMENTO DINÂMICO E POR ABRASÃO DE GEOTÊXTEIS

RUI JORGE MORAIS PEREIRA VIANA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE CONSTRUÇÃO

Orientador: Professora Doutora Maria de Lurdes da Costa Lopes

JULHO DE 2011

Aos meus Pais

À Mirjana

AGRADECIMENTOS

No final desta dissertação expresso os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a realização da mesma, referindo:

À minha orientadora Professora Doutora Maria de Lurdes Lopes, por todo o apoio e permanente disponibilidade ao longo do trabalho desenvolvido.

O Engenheiro Miguel Morais, por todo o apoio na operação e manutenção do equipamento laboratorial assim como pela troca de ideias e opiniões.

Ao Laboratório de Materiais de Construção pela disponibilidade demonstrada.

Aos meus pais pelo apoio dado nos momentos mais difíceis.

À Mirjana, por todo o apoio, paciência e incentivo.

RESUMO

Os geossintéticos são cada vez mais uma parte integrante das obras de Engenharia Civil, devido às vantagens que apresentam em relação aos materiais e tecnologias tradicionais. Associado a estas vantagens acresce o facto de serem materiais de fácil e rápida instalação com custos inferiores aos materiais tradicionais.

O estudo da durabilidade dos geossintéticos, assim como as alterações das suas propriedades mecânicas quando submetidos a danificações durante a fase de instalação e ao desgaste por abrasão são aspectos relevantes que podem comprometer o bom funcionamento das estruturas nas quais estão inseridos.

Nesta dissertação são estudadas as alterações de algumas propriedades mecânicas para geossintéticos submetidos à abrasão e ao efeito conjunto da abrasão precedida de danificação induzida por punçoamento dinâmico.

Estas propriedades mecânicas são caracterizadas através de ensaios de tracção-extensão aos geossintéticos em estudo.

No que se refere à organização da dissertação, a mesma é composta por 5 capítulos.

No Capítulo 1, é feita uma breve introdução ao tema da dissertação e aos respectivos objectivos propostos na elaboração da mesma.

No Capítulo 2 é apresentada a definição e tipo de geossintéticos existentes, seus materiais constituintes e respectivos processos de fabrico associados. São também apresentadas as principais funções que podem ser desempenhadas pelos geossintéticos assim como as suas aplicações nas diversas áreas da Engenharia.

No Capítulo 3 é apresentada uma descrição da componente laboratorial, a qual é constituída pela descrição dos equipamentos utilizados nos ensaios, assim como dos procedimentos previstos nas normas de ensaio seguidas em laboratório.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios realizados, a análise dos mesmos, bem como as conclusões emanadas do estudo laboratorial realizado.

No Capítulo 5 são apresentadas sugestões para futuros desenvolvimentos do tema estudado no presente trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Geocompósitos de reforço, durabilidade mecânica, tracção-extensão, abrasão, punçoamento dinâmico.

ABSTRACT

Geosynthetics are increasingly making part of Civil Engineering works, thanks to advantages they present compared to traditional technology materials. Some of the advantages are that they can be easily and quickly installed for lower cost, compared to traditional materials.

Some of the important aspects, that can promise good functioning of the structures where they were installed, are durability studies and changing of their mechanical behaviour, when subjected to damage during the installation phase and abrasion.

In this dissertation are studied changes of some geosynthetics mechanical behaviours, exposed to abrasion, and abrasion preceded by damage induced by dynamic punching.

These mechanical behaviours are characterized through testing of dynamic thrust-extension in geosynthetic's studies.

Dissertation consists of 5 chapters.

In Chapter 1, there is a brief introduction to the topic of dissertation and its objectives.

In Chapter 2, there are presented: definition and types of existing geosynthetics, the materials they consist of, and manufacturing processes associated, as well as main functions that can be performed by geosynthetics and applied to different Engineering areas.

In Chapter 3 is presented a description of the laboratory equipment used for tests, and also a description of procedures followed in the testing standards in the laboratory.

In Chapter 4 are presented the results and analysis of tests performed, as well as conclusions got from the laboratory studies.

In Chapter 5 are presented suggestions for the future developments of the subject studied in this work

KEYWORDS: Geocomposites for reinforcement, mechanical durability, dynamic thrust - extension, abrasion, dynamic punching.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE QUADROS

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – Área

CV – Coeficiente de variação [%]

DF – Direcção de fabrico

DPF – Direcção perpendicular à de fabrico

EN – Norma Europeia

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

F_{max} – Força máxima

$F_{(pré\text{-}carga)}$ - Força de tracção do último valor na fase de pré-carga

GC - Geocompósito

ISO – Organização Internacional de Normalização

J_{sec} – Rigidez secante

J_{sec} 2% – Rigidez secante para uma extensão de 2%

J_{sec} 5% – Rigidez secante para uma extensão de 5%

J_{sec} 10% – Rigidez secante para uma extensão de 10%

J_{sec} ε_{Fmax} – Rigidez secante para a extensão na força máxima

L – Distância entre dois pontos de referência

L_0 – Distância inicial de referência

$L_{0(pré\text{-}carga)}$ - Distância entre as faces das pegas para o último valor na fase de pré-carga

m – Massa

NP – Norma Portuguesa

PET – Poliéster

PP - Polipropileno

T – Resistência à tracção

$T_{referência}$ - Resistência à tracção para provetes intactos

$T_{abrasão}$ - Resistência à tracção para provetes submetidos à abrasão

ε – Extensão

ε_{Fmax} – Extensão para a força máxima

ρ_A – Massa por unidade de área

VM – Média dos provetes ensaiados

VCM – Curva média força-extensão

W – Robustez

1
INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A aplicação de geossintéticos em obras de Engenharia Civil tem sido crescente nos últimos anos. Para este facto contribuiu a crescente variedade de aplicações destes materiais das quais se destacam: aterros reforçados, aterros para deposição de resíduos perigosos, aterros para deposição de resíduos domésticos e industriais, muros de suporte, estruturas de controlo de erosão, estruturas de protecção costeira e infra estruturas de obras rodoviárias e ferroviárias.

A crescente utilização de geossintéticos é explicada por estes serem materiais de fácil e rápida instalação com custos inferiores relativamente aos materiais tradicionais.

Um dos aspectos de maior relevância na área dos geossintéticos é o estudo da sua durabilidade, em particular, das acções mecânicas a que estes materiais estão sujeitos durante os processos de instalação e construção, cujos efeitos podem comprometer o bom funcionamento das estruturas em que estão inseridos (Paula, 2003).

Nas obras em geral, os efeitos dos procedimentos de instalação são bastante importantes e implicam, geralmente, reduções imediatas e significativas das propriedades dos geossintéticos (Pinho Lopes, 2004). Além das danificações sofridas durante a instalação, também o desgaste por abrasão deve ser tido em conta na quantificação da redução das propriedades dos geossintéticos.

Esta dissertação tem como objectivo a análise do efeito da abrasão em geossintéticos, assim como a análise do efeito conjunto (sinergia) da abrasão precedida de danificação induzida por punçoamento dinâmico.

Os geossintéticos considerados são dois geocompósitos de reforço, cada vez mais utilizados em infra-estruturas ferroviárias, já que para além da função de reforço podem exercer convenientemente as funções de separação e filtragem, sendo estas as três funções mais usualmente exigidas aos geossintéticos aplicados neste tipo de infra-estruturas.

As danificações consideradas são também correntes nas infra-estruturas ferroviárias. Como é sabido, o movimento dos comboios induz abrasão nos geossintéticos através do movimento do balastro adjacente. Por outro lado, o balastro ao ser vertido sobre o geossintético pode provocar a danificação imediata deste, à qual se seguirá inevitavelmente a danificação por abrasão.

Neste trabalho optou-se por considerar apenas a influência dos dois tipos de danificação considerados em algumas das propriedades dos geossintéticos ensaiados, em particular as associadas ao comportamento mecânico caracterizado pelos ensaios de tracção-extensão.

Estas alterações das propriedades são quantificadas, tendo como referência os valores das mesmas propriedades dos materiais intactos. São também comparadas as alterações das propriedades para os dois tipos de danificação induzidos.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é composta por 5 capítulos.

No presente capítulo, é feita uma breve introdução ao tema da dissertação e aos respectivos objectivos propostos na elaboração da mesma.

No Capítulo 2 é apresentada a definição e tipo de geossintéticos existentes, seus materiais constituintes e respectivos processos de fabrico associados. São também apresentadas as principais funções que podem ser desempenhadas pelos geossintéticos, assim como as suas aplicações nas diversas áreas da Engenharia.

No Capítulo 3 é apresentada uma descrição da componente laboratorial, a qual é constituída pela descrição dos equipamentos utilizados nos ensaios, assim como dos procedimentos previstos nas normas de ensaio seguidas em laboratório.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios realizados, a análise dos mesmos, bem como as conclusões emanadas do estudo laboratorial realizado.

No Capítulo 5 são apresentadas sugestões para futuros desenvolvimentos do tema estudado no presente trabalho.

2
GEOSSINTÉTICOS

2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os principais tipos de geossintéticos, os seus materiais constituintes e processos de fabrico. As funções desempenhadas pelos geossintéticos e suas aplicações, são também referidas.

2.2. DEFINIÇÃO E TIPO DE GEOSSINTÉTICOS

Segundo a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), um geossintético é um material polimérico, natural ou sintético, usado em contacto com materiais naturais (como os solos ou as rochas) ou com qualquer outro material geotécnico, utilizado em aplicações de Engenharia Civil.

De acordo com a IGS, os geossintéticos podem ser classificados com base no processo de fabrico, e divididos nas seguintes categorias: geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompósitos, geocompósitos bentoníticos (GCL's), geotubos, geocélulas e geoexpandido. Mais recentemente, no CEN (Comité Europeu de Normalização TC 189-Geosynthetics) foi introduzido o conceito de barreira geossintética, que engloba as geomembranas e os geocompósitos bentoníticos (Rosete, 2010).

2.3. MATERIAIS CONSTITUINTES

As matérias-primas utilizadas no fabrico de geossintéticos dividem-se em dois grandes grupos: naturais e químicas (Pinho Lopes, 2004).

As matérias-primas que têm por base as fibras naturais (ex: algodão, lã, seda, etc.) são cada vez menos utilizadas devido ao facto de serem biodegradáveis e de não possuírem as propriedades mecânicas exigidas num grande número de aplicações. Assim sendo a maioria dos geossintéticos são produzidos a partir de materiais orgânicos sintéticos vulgarmente designados por plásticos.

Os plásticos podem dividir-se em termoplásticos e plásticos termo-endurecidos. Os termoplásticos podem amolecer e endurecer mediante aquecimento ou arrefecimento, respectivamente. Os plásticos termo-endurecidos endurecem, a partir do estado de fusão, no entanto não podem amolecer por acção do calor (Pinho Lopes, 2004).

Os termoplásticos são os materiais mais utilizados no fabrico de geossintéticos.

Os termoplásticos são obtidos a partir de um polímero base ao qual são adicionados aditivos para melhorar as propriedades/desempenho do material.

2.3.1. POLÍMEROS

Os polímeros são moléculas compostas formadas essencialmente pela repetição de monómeros, formando longas cadeias moleculares – macromoléculas. A formação dessas cadeias moleculares, feita através de uma série de mecanismos químicos, é designada por polimerização. (Pinho Lopes, 2004)

Os polímeros mais utilizados no fabrico de geossintéticos são: as poliamidas (PA) ou nylons, os poliésteres (PET), o polipropileno (PP), o poliestireno (PS), o policloreto de vinilo (PVC), os polietilenos (PE): polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de muito baixa densidade (PEMBD), polietileno de média densidade (PEMD), polietileno clorinado (CPE), polietileno clorossulfunado (PECS) (Shukla, 2002). Os polímeros mais comummente usados em alguns tipos de geossintético estão indicados no Quadro 2.1

Quadro 2.1 - Polímeros base utilizados em cada tipo de geossintético (Shukla, 2002).

Geossintético	Polímeros
Geotêxteis	PP, PET, PA, PE
Geogrelhas	PEAD, PET, PP
Georredes	PEMD, PEAD
Geomembranas	PE, PVC, CPE, PECS

Determinadas características dos polímeros, como o peso molecular e a organização tridimensional das cadeias poliméricas influenciam as propriedades dos materiais poliméricos.

O peso molecular de um polímero (produto do peso molecular dos monómeros pelo número de vezes que os monómeros se repetem na cadeia polimérica) tem uma grande influência nas propriedades (e no comportamento) dos materiais poliméricos: o aumento do peso molecular provoca o aumento da resistência à tracção, da extensão, da rigidez, da resistência ao impacto, da resistência ao calor e da resistência ao aparecimento de fendas; além disso, origina uma diminuição da fluência, dificulta a manipulação dos materiais e pode ter efeitos na durabilidade dos materiais (Carneiro, 2009).

A organização tridimensional das cadeias poliméricas, medida pela cristalinidade, é outra propriedade determinante para as propriedades dos polímeros; os polímeros podem ser divididos em amorfos ou semi-cristalinos (não existem polímeros puramente cristalinos). O aumento da cristalinidade de um material polimérico resulta no aumento da resistência à tracção, da rigidez, da resistência ao calor e da resistência química; além disso, origina uma diminuição da permeabilidade, da deformação, da flexibilidade e da transparência. Os polímeros semi-cristalinos são normalmente mais densos que os polímeros amorfos (uma vez que possuem uma estrutura molecular mais arrumada). A percentagem de cristalinidade dos polímeros usados para o fabrico de geossintéticos varia normalmente entre os 30% (para o policloreto de vinilo) e os 75% (para o polietileno de alta densidade) (Carneiro, 2009).

No Quadro 2.2 é feita uma análise comparativa entre algumas propriedades dos polímeros utilizados no fabrico dos geossintéticos.

Quadro 2.2 - Comparação de algumas propriedades dos polímeros normalmente usados para o fabrico de geossintéticos (Shukla,2002).

Propriedades			Polímeros			
			PE	PP	PET	PA
Resistência à tracção			Baixo	Baixo	Elevado	Médio
Rigidez			Baixo	Baixo	Elevado	Médio
Extensão na rotura			Elevado	Elevado	Médio	Médio
Fluência			Elevado	Elevado	Baixo	Médio
Peso volúmico			Baixo	Baixo	Elevado	Médio
Custo			Baixo	Baixo	Elevado	Médio
Resistência a	Radiação UV	Não estabilizado	Médio	Baixo	Elevado	Médio
		Estabilizado	Elevado	Elevado	Elevado	Médio
	Bases		Elevado	Elevado	Baixo	Elevado
	Microrganismos		Médio	Elevado	Médio	Médio
	Óleos		Baixo	Baixo	Médio	Médio
	Detergentes		Elevado	Elevado	Elevado	Elevado

Segundo Shukla (2002), a maioria dos geotêxteis são manufacturados a partir do polipropileno ou do poliéster.

A utilização do polipropileno deve-se ao seu custo reduzido, associado ainda à sua elevada resistência química a soluções ácidas e alcalinas. Este material se adequadamente estabilizado apresenta também uma resistência elevada às radiações ultravioleta. A maior desvantagem na sua utilização é a sua elevada fluência, o que faz com que seja pouco aplicado em situações de cargas elevadas a longo prazo (Pinho Lopes, 2004).

O poliéster, tem vindo cada vez mais a ser utilizado em aplicações em que as propriedades mecânicas são essenciais, visto possuir elevada resistência à tracção e fluência reduzida. A resistência química é excelente com excepção dos ambientes alcalinos. Este polímero tem a grande vantagem de ser estável à radiação ultravioleta (Pinho Lopes, 2004).

2.3.2. ADITIVOS

A melhoria das propriedades de um termoplástico pode ser conseguida por introdução de diversos aditivos durante o seu processo de fabrico (Pinho Lopes, 2004). Estes aditivos permitem melhorar as propriedades, processamento e desempenho dos materiais poliméricos. Os aditivos são normalmente classificados de acordo com a função que irão desempenhar (e não de acordo com as suas propriedades químicas) (Carneiro, 2009). A descrição dos aditivos correntemente usados é apresentada de seguida:

Antioxidantes: aditivos usados para proteger os polímeros da degradação oxidativa, tanto durante o processamento, como durante o tempo de serviço. A degradação oxidativa dos polímeros pode ser

iniciada pela acção do calor, pela acção da radiação ultravioleta (UV), por impurezas metálicas ou por “stress” mecânico. Os antioxidantes são muito usados para aumentar a resistência das poliolefinas à oxidação.

Biocidas: aditivos que protegem os polímeros da acção das bactérias, fungos, algas ou bolores. Na ausência de biocidas, e em determinadas condições (normalmente ambientes quentes e húmidos), estes organismos podem desenvolver-se à superfície dos materiais poliméricos e provocar reacções alérgicas, odores desagradáveis e eventualmente uma falha prematura dos materiais. Os dois tipos mais comuns de biocidas são os fungicidas e os bactericidas.

Estabilizantes UV: aditivos usados para retardar ou suprimir as reacções químicas provocadas pela exposição à radiação UV. Na ausência destes aditivos, os materiais poliméricos usados em aplicações exteriores podem sofrer alterações indesejáveis nas suas propriedades físicas e mecânicas (redução de resistência, aparecimento de fissuras, descoloração, entre outras alterações).

Estabilizantes térmicos: aditivos usados para reduzir ou evitar a degradação térmica de materiais poliméricos expostos a temperaturas elevadas (durante o processamento e durante o tempo de vida útil dos produtos finais).

Retardantes de chama: aditivos usados para dificultar a ignição, reduzir a formação de fumo e para diminuir a velocidade de combustão dos materiais poliméricos.

Plastificantes: aditivos usados para tornar os materiais poliméricos mais maleáveis, mais flexíveis e mais macios; podem também permitir o aumento da resistência ao impacto. Os plastificantes são muito utilizados para melhorar as características do PVC (aumento da flexibilidade).

Pigmentos: aditivos adicionados aos materiais poliméricos para lhes conferir cor. Dependendo do pigmento, podem também fornecer estabilização contra a acção de alguns agentes de degradação, como a radiação UV. O pigmento mais utilizado em geossintéticos é o negro de carbono.

2.4. PROCESSO DE FABRICO DOS GEOSSINTÉTICOS

O processo de fabrico de um geossintético é composto por três passos:

a) Produção da mistura polimérica
b) Produção dos componentes do geossintético
c) Conversão dos componentes no geossintético

2.4.1. PRODUÇÃO DA MISTURA POLIMÉRICA

A mistura polimérica é produzida através da junção do polímero base com aditivos.

O polímero base, produzido por indústrias químicas especializadas, é normalmente fornecido aos fabricantes de geossintéticos já incorporando na sua composição aditivos para facilitar as operações de transformação e impedir a degradação durante o armazenamento ou transformação.

Estes polímeros são fornecidos aos fabricantes de geossintéticos sob a forma granular ou esférica.

Apesar do polímero base ter já na sua composição incluídos aditivos, o que por definição o denominava como um plástico, visto serem adicionados novos aditivos para conferir ao material final as propriedades adequadas às funções que irá desempenhar, adopta-se a designação de polímero base ao material inicial designando-se o produto final, desta fase, como mistura polimérica.

2.4.2. Produção dos componentes dos geossintéticos

Os componentes geossintéticos usualmente são obtidos por extrusão da mistura polimérica. No processo de extrusão ou fiação líquida, a mistura polimérica é introduzida num recipiente ficando sujeito a pressões e temperaturas controladas. Posteriormente, a mistura polimérica é forçada a passar no molde de extrusão, no qual podem ser produzidas as mais variadas formas.

As formas mais comuns e respectivo molde de extrusão usado para a sua produção são apresentadas de seguida:

a) Filamento contínuo circular, com diâmetro médio de alguns micrómetros e comprimento indefinido;

   Molde de extrusão - placa perfurada com orifícios de diâmetro conhecido.

b) Tira plana contínua, com alguns milímetros de largura, vários micrómetros de espessura e comprimento indefinido;

   Molde de extrusão – fenda com espessura conhecida. As tiras podem também ser obtidas através do corte das películas.

c) Folha ou película, podendo ter alguns metros de largura e uma espessura a variar entre uma fracção de milímetro (película) e vários milímetros (folha).

   Molde de extrusão – fenda com espessura conhecida.

De forma a melhorar as propriedades das tiras e dos filamentos (resistência à tracção, extensão na rotura, módulo de rigidez, fluência, etc.) estes são submetidos a processos de estiramento e solidificação, através de tratamentos por temperatura. O estiramento reduz a secção dos componentes e provoca a reorientação da cadeia molecular na direcção em que este foi aplicado, originando uma estrutura final mais cristalina (Carneiro, 2009).

Na Figura 2.1 apresenta-se o processo industrial de fabrico e estiramento de monofilamentos de PP.

a) b)

c) d)

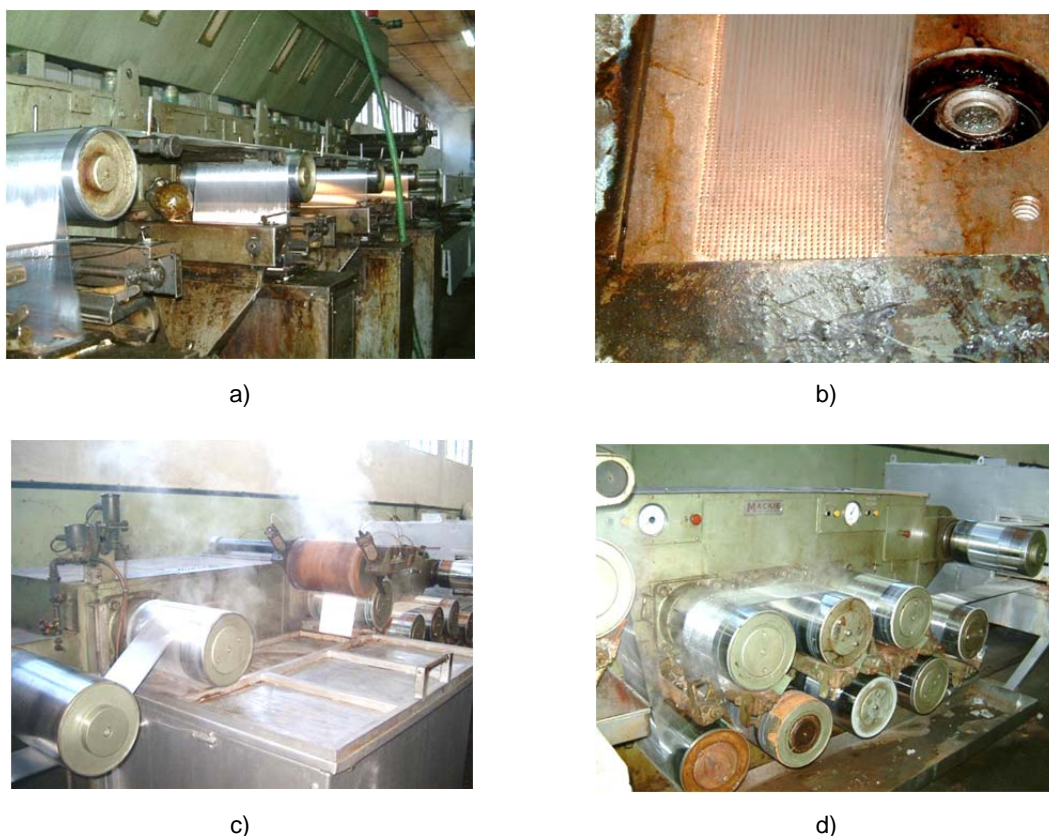



Fig. 2.1 – Processo industrial de fabrico e estiramento de monofilamentos de PP: a) Vista geral do fabrico; b) Pormenor do molde de extrusão; c) Passagem por um tanque de água quente para efectuar o estiramento; d) Passagem por cilindros rotativos para efectuar o estiramento. (Carneiro, 2009)].

Antes da conversão no produto final, os componentes podem ser sujeitos a fases intermédias de fabrico. Assim, os filamentos podem ser usados individualmente (monofilamento) ou em conjunto tais como: fios (formados por vários filamentos torcidos), multifilamentos (formados pelo alinhamento paralelo de vários filamentos) ou fibras (formado a partir do corte de filamentos com cerca de 50mm de comprimento). Analogamente, as tiras podem também ser usadas individualmente ou torcidas, formando fios de tiras (Lopes, 1998).

2.4.3. Produção de geossintéticos

A última fase do processo de fabrico de um geossintético consiste na combinação dos componentes de forma a obter a estrutura final. A estrutura final é influenciada pela técnica usada (Lopes, 1998)

De seguida são apresentadas as técnicas utilizadas na manufactura dos seguintes geossintéticos: geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas e geocompósitos.

2.4.3.1. Geotêxteis

Existem três processos de manufactura dos geotêxteis, os quais dão origem a três tipos de materiais: tecidos, não tecidos e tricotados. Dentro de cada um dos processos, a utilização de diferentes componentes condiciona o seu aspecto e propriedades finais.

Na Figura 2.2 são apresentados exemplos de geotêxteis tecidos e não tecidos:

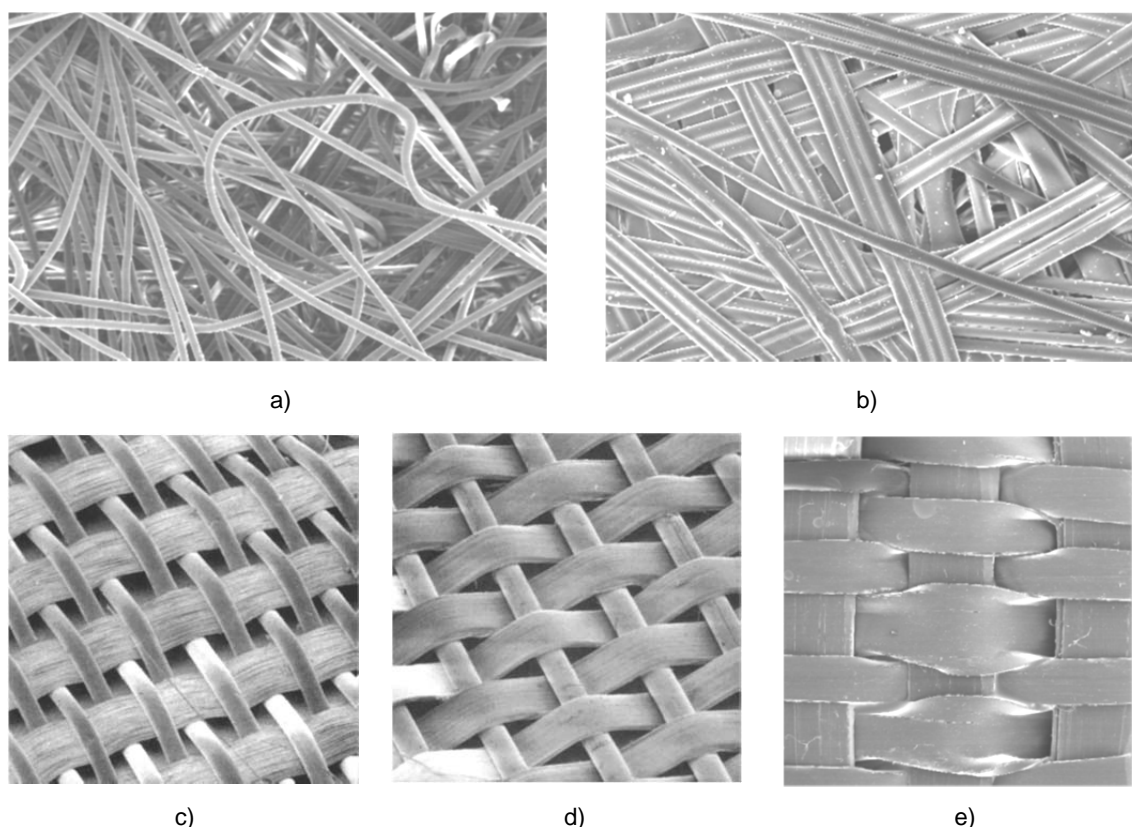



Fig. 2.2 – Geotêxteis tecidos e não-tecidos: a) Não-tecido com ligação mecânica; b) Não-tecido com ligação térmica; c) Tecido com monofilamento e multifilamento; d) Tecido com monofilamento e tira; e) Tecido com tiras. [c), d) (Ingold, 1994); a), b), e) (Carneiro, 2009)].

Geotêxteis tecidos

Os geotêxteis tecidos são produzidos através de processos tradicionais de tecelagem, em que dois conjuntos de componentes (normalmente perpendiculares) são entrelaçados entre si, formando uma estrutura plana com poucos milímetros de espessura e com uma distribuição de poros relativamente regular (Figura 2.3). Os componentes básicos normalmente usados no fabrico de geotêxteis tecidos incluem monofilamentos, multifilamentos e tiras. De um modo geral, os geotêxteis tecidos possuem espessuras compreendidas entre os 0,5 e os 2 mm (Carneiro, 2009).

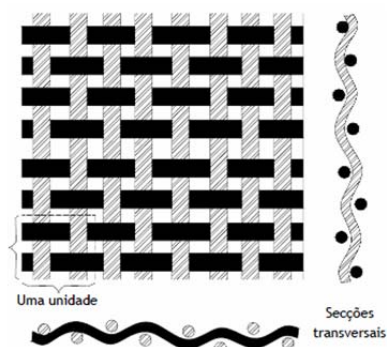



Fig. 2.3 – Estrutura dos geotêxteis tecidos

Geotêxteis não-tecidos

Os geotêxteis não-tecidos são produzidos dispondo os componentes (normalmente monofilamentos contínuos ou fibras) numa malha solta (mais espessa do que o produto final) e efectuando a sua ligação (mecânica, térmica ou química). Os geotêxteis não-tecidos possuem uma estrutura plana com uma distribuição aleatória de poros.

A ligação mecânica (muitas vezes designada por agulhagem) é conseguida através da passagem da malha solta através de milhares de agulhas (com farpas) que se movimentam continuamente (Figura 2.4). As agulhas penetram na malha arrastando consigo alguns componentes e entrelaçando-os com outros. Os geotêxteis obtidos por este processo designam-se por não-tecidos agulhados e possuem espessuras normalmente compreendidas entre os 0,5 e os 5 mm.

A ligação térmica é conseguida através do aquecimento da malha. Para os materiais formados por componentes com a mesma composição química, a temperatura deve ser aplicada apenas em alguns pontos da malha (pontos a ligar), de modo a evitar a fusão global dos componentes. No caso de os componentes não possuírem a mesma composição química (diferentes polímeros com diferentes pontos de fusão), a fusão selectiva de um dos componentes (o de menor ponto de fusão) irá originar uma ligação por fusão nos pontos de contacto entre este componente e os restantes componentes. Os geotêxteis não-tecidos obtidos por este processo designam-se por termoligados (ou termossoldados) e, normalmente, possuem uma espessura compreendida entre 0,5 e 1 mm.

A ligação química é conseguida através da pulverização ou impregnação da malha com um agente de ligação químico (como a cola, resina ou derivado celulósico). Os geotêxteis obtidos por este processo designam-se por geotêxteis não-tecidos quimicamente ligados; a espessura destes materiais varia normalmente entre os 3 e os 5mm. Em algumas situações, a ligação química complementa uma ligação feita por agulhagem, de modo a melhorar as ligações entre os componentes.

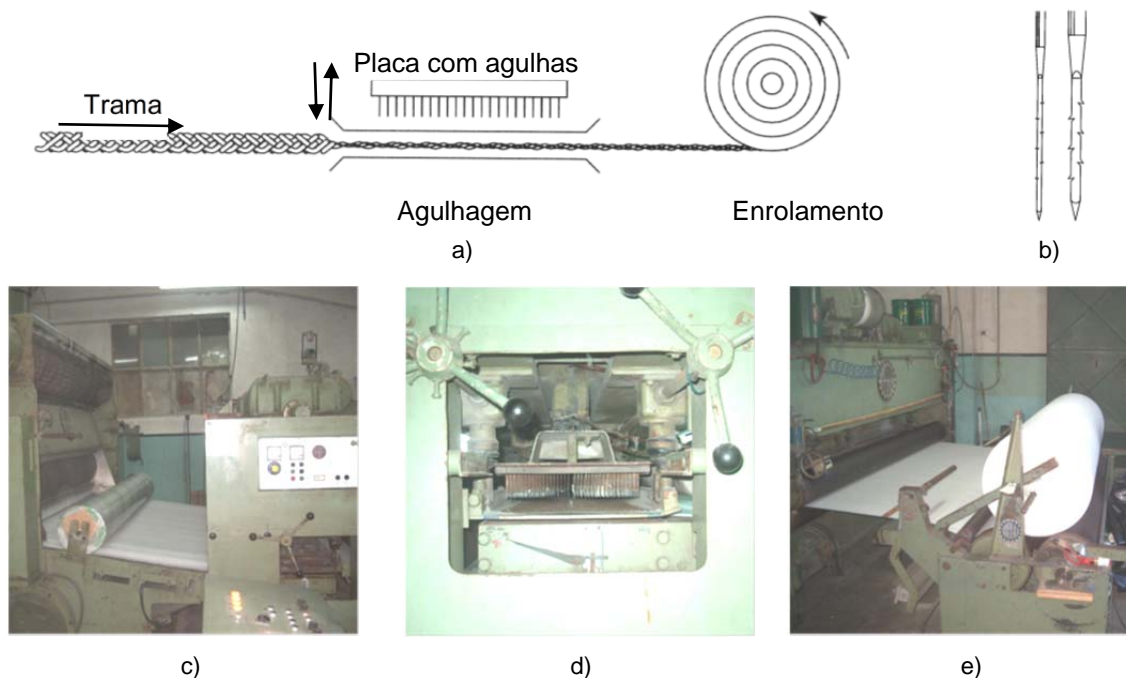



Fig. 2.4 – Processo de fabrico de geotêxteis não tecidos agulhados: a) Esquema geral; b) Exemplos de agulhas; c) Processo de agulhagem; d) Pormenor da placa com agulhas; e) Enrolamento do geotêxtil após o processo de agulhagem [a), b) (Koerner, 1998); c), d), e) (Carneiro, 2009)].

Geotêxteis tricotados

Os geotêxteis tricotados são fabricados entrelaçando fios de modo a formarem uma estrutura plana. Os geotêxteis tricotados são muito pouco utilizados, uma vez que apresentam uma deformação excessiva, por aplicação de carga. Para solucionar este problema poderão ser introduzidos fios de elevada resistência, com deformações reduzidas, na direcção longitudinal.

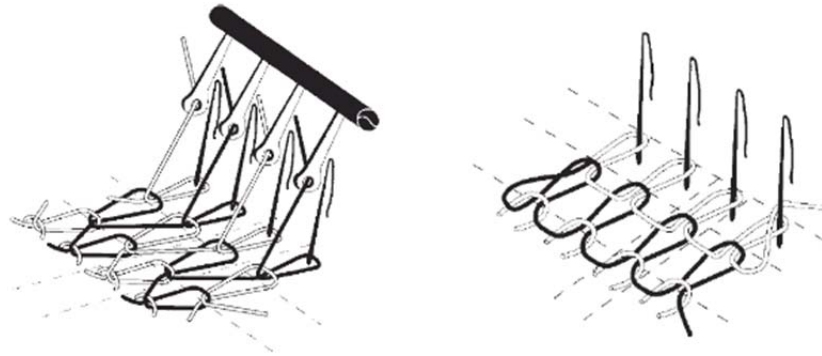



Fig. 2.5 – Estruturas típicas de têxteis tricotados (Carneiro, 2009)

2.4.3.2. Geogrelhas

As geogrelhas são malhas abertas constituídas por estruturas poliméricas planas. Nas geogrelhas é usual as aberturas serem maiores que os elementos sólidos que as constituem.

As geogrelhas podem ser fabricadas por: extrusão (seguida de estiramento da folha do componente), tecelagem (com posterior aplicação de revestimento), ligação térmica e soldadura a laser.

Geogrelhas obtidas por extrusão

As geogrelhas extrudidas são produzidas a partir de folhas de polímero aditivado, num processo composto por duas ou três fases.

De início uma folha de plástico (usualmente com 4 a 6mm) de espessura é introduzida numa máquina que a irá perfurar de forma regular. Seguidamente a folha de plástico perfurada é aquecida e estirada na sua direcção de fabrico. O estiramento da folha permite que as aberturas se alonguem, provocando também a orientação das cadeias moleculares na direcção do estiramento. Esta orientação molecular traduz-se num aumento da resistência à tracção e da rigidez da grelha na direcção do estiramento. Estas grelhas são designadas por geogrelhas extrudidas uniaxiais e a sua produção comporta duas fases (perfuração da folha de plástico e estiramento uniaxial).

Caso no processo de fabrico, a geogrelha seja novamente aquecida e aplicado um estiramento na direcção transversal, obtêm-se uma grelha extrudida biaxial.

Geralmente, os polímeros usados no processo de fabrico das geogrelhas são o polietileno de alta densidade e o polipropileno. Este tipo de grelhas é usualmente designado por geogrelha homogénea ou relativamente rígida. (Koerner, 1998).

Geogrelhas obtidas por tecelagem

As geogrelhas obtidas por tecelagem são vulgarmente designadas por geogrelhas tecidas. Estas são produzidas através da união de centenas de fibras de forma a obterem-se barras longitudinais e

transversais, separadas por aberturas. Nos cruzamentos, estas barras são unidas por tricotagem ou entrelaçagem, e posteriormente todo o conjunto é protegido por um revestimento que lhe confere estabilidade dimensional e protege as barras durante a instalação em obra da geogrelha. Geralmente estas geogrelhas são fabricadas em poliéster de tenacidade elevada e o revestimento pode ser de PVC, látex, betuminoso, entre outros. Esta geogrelha é uma geogrelha relativamente flexível.

Geogrelhas obtidas por ligação térmica

As geogrelhas obtidas por ligação térmica são produzidas através da fusão dos pontos de cruzamento das barras. Geralmente estas geogrelhas são constituídas por fibras de PET unidas e envoltas numa folha de PP.

Geogrelhas obtidas por soldadura laser

As geogrelhas obtidas por soldadura a laser são produzidas através da fusão a laser das uniões das barras que as constituem. Geralmente estas geogrelhas são fabricadas recorrendo a barras de PET ou PP. Usualmente as barras que constituem estas geogrelhas têm maior rigidez do que as barras utilizadas no fabrico das geogrelhas tecidas e com ligação térmica.

2.4.3.3. Georredes

As georredes são fabricadas por extrusão do polímero fundido através de aberturas existentes em moldes rotativos, dando origem a malhas ou redes apertadas de barras. Numa fase seguinte estas redes são abertas através da passagem por moldes cónicos aquecidos sendo posteriormente arrefecidas. As barras que constituem as georredes formam ângulos de 60º a 75º e as suas uniões são integrais (Shukla, 2002).

As georredes são, usualmente, fabricadas com polietileno, sendo que a nível de estrutura poderiam ser incluídas no grupo das geogrelhas, no entanto é-lhes atribuída uma classificação diferente devido à função a que se destinam, distinta das geogrelhas.

2.4.3.4. Geomembranas

As geomembranas podem ser fabricadas por: extrusão, calandragem e por espalhamento superficial.

Geomembranas obtidas por extrusão

O processo de extrusão consiste em produzir uma folha não reforçada, através da extrusão do polímero fundido e junção dos aditivos adequados. A extrusão permite o fabrico de geomembranas com espessuras normalmente compreendidas entre os 0,1 e os 5 mm e larguras entre 1 a 5 m.

Refira-se que após a extrusão, as geomembranas (ainda a quente) podem ser reforçadas pela adição de um geotêxtil; Note-se que as geomembranas reforçadas combinam dois tipos de geossintéticos e, assim, podem ser consideradas geocompósitos.

Geomembranas obtidas por calandragem

A calandragem consiste na passagem do material por cilindros aquecidos e de rotação contrária. Este processo é o mais usado no fabrico das geomembranas, sendo muitas vezes aplicado na sequência do processo de extrusão.

O processo de calandragem permite fabricar geomembranas reforçadas e não reforçadas. As reforçadas são do tipo multicamadas nas quais é incluído entre as camadas um geotêxtil.

Geomembranas obtidas por espalhamento superficial

Este processo é o mais recente e também o menos usado, consistindo no espalhamento de um polímero em fusão sobre um geotêxtil, revestindo-o. As geomembranas produzidas por este processo são reforçadas, podendo também ser considerados geocompósitos.

Mediante a superfície, as geomembranas pode ser divididas em dois grupos: lisas e texturadas.

Geomembranas lisas

Estas geomembranas têm uma superfície lisa.

Geomembranas texturadas

Estas geomembranas muitas vezes são produzidas a partir de geomembranas lisas nas quais é induzida a formação de uma textura na superfície dos materiais através de métodos tais como: a pulverização, a impressão, a laminação etc.. A textura na superfície das geomembranas provoca um aumento do atrito na interface com outro material.

2.4.3.5. Geocompósitos

Os geocompósitos são materiais poliméricos, formados por dois ou mais materiais, em que pelo menos um dos componentes é um geossintético.

Os geocompósitos têm como objectivo a combinação de diferentes materiais, de forma a obter-se um material com propriedades superiores aos que lhe deram origem, para desempenhar a função a que se destina.

Os geocompósitos mais comuns são classificados mediante a função que vão desempenhar, assim temos: os geocompósitos bentoníticos, os geocompósitos de drenagem e os geocompósitos de reforço.

Geocompósitos bentoníticos

Estes geocompósitos, também designados por barreiras geossintéticas argilosas, são constituídos pela associação de uma camada de bentonite com geossintéticos, geralmente geotêxteis ou geomembranas. A ligação entre os materiais pode ser realizada utilizando cola, por costura ou por agulhagem (Lopes, 1998).

Os geocompósitos bentoníticos podem ser produzidos por dois processos, sendo que ambos partem da utilização da bentonite. A bentonite utilizada, na manufactura destes geocompósitos, é extraída, seguidamente é seca na estufa e peneirada para retirar as impurezas presentes. Por fim, a bentonite é armazenada em silos, sob a forma de pó ou grão.

Num dos processos de produção, a cola e a bentonite são vertidas alternadamente sobre o geossintético inferior, seguindo-se a colocação do geossintético superior. Este conjunto é posteriormente aquecido ou submetido ao processo de calandragem. Estas operações têm como objectivo a redução do teor de água remanescente e a uniformização da espessura do geocompósito (Lopes,1998)

No outro processo a bentonite é vertida sobre um geotêxtil, sendo posteriormente colocado outro geotêxtil sobre o primeiro. O conjunto formado é passado por uma central de agulhagem. O geotêxtil superior deve ser um geotêxtil não tecido agulhado, para que a agulha arraste filamentos do geotêxtil através da bentonite até ao geotêxtil inferior.

Ambos os processos terminam com o enrolamento dos geocompósitos bentoníticos num núcleo rígido com o comprimento e peso pretendido. Os rolos obtidos são depois embrulhados em folhas de polietileno ou fechados em sacos de plástico para armazenamento e transporte (Lopes, 1998).

Geocompósitos de drenagem

Estes geocompósitos são resultantes de sois tipos de associações: geotêxteis e georredes e geotêxteis com núcleos poliméricos. O processo de fabrico destes geocompósitos consiste no fabrico independente dos seus componentes e na união dos mesmos. Esta união muitas vezes não é mais que uma ligação térmica.

Geocompósitos de reforço

Estes geocompósitos são resultantes de várias combinações possíveis, de entre as quais se pode mencionar a introdução de fibras de elevada resistência tecidas sobre um geotêxtil não tecido.

2.5. FUNÇÕES DO GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos são compostos por distintos materiais com características bem diferenciadas entre eles. As características de cada material determinam a sua aplicabilidade à função pretendida, porém os geossintéticos podem desempenhar uma ou mais funções em simultâneo, pelo que para se obter um correcto dimensionamento dos materiais é necessário definir e hierarquizar essas funções.

A norma EN ISO 10318:2005 descreve as funções que os geossintéticos podem desempenhar: (1) drenagem, (2) filtragem, (3) protecção, (4) reforço, (5) separação, (6) controlo de erosão superficial e (7) barreira de fluidos (ver Figura 2.6).

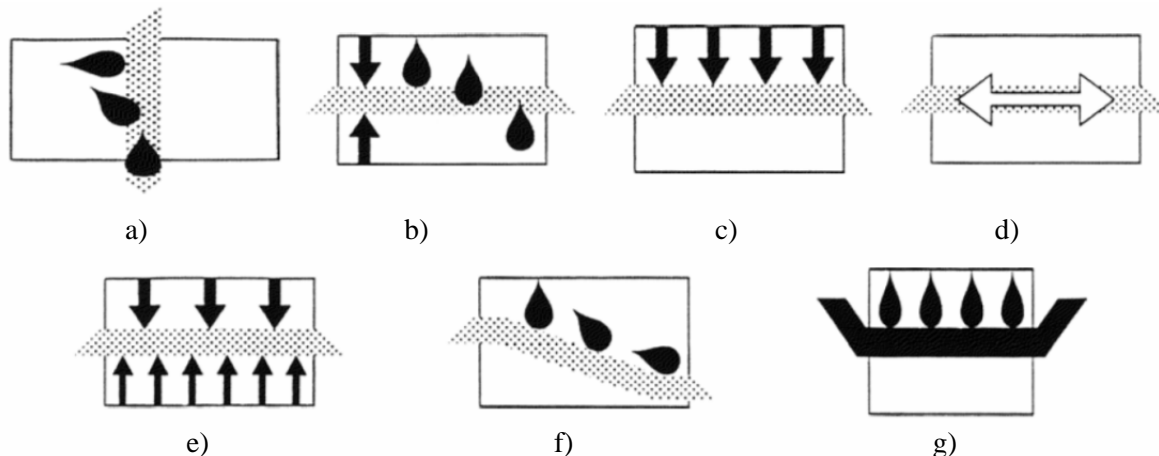



Fig. 2.6 – Principais funções desempenhadas pelos geossintéticos (EN ISO 10318:2005): a) Drenagem; b) Filtragem; c) Protecção; d) Reforço; e) Separação; f) Controlo de erosão superficial; g) Barreira de fluidos.

A descrição de cada uma das funções é apresentada de seguida:

Drenagem

A função de drenagem consiste na recolha e no transporte de fluidos (líquidos ou gases) ao longo do plano de um geossintético.

Os geossintéticos que desempenham esta função deverão assegurar a evacuação da água ou gás no plano do geossintético com uma pequena perda de carga. As aberturas destes geossintéticos devem ter dimensões que impeçam a entrada de partículas sólidas e consequente transporte para o interior do dreno, o que originaria a blocagem ou colmatação do mesmo.

Filtragem

A função de filtragem consiste em reter o solo ou outras partículas sujeitas a forças hidrodinâmicas, aplicadas num plano normal ao material, enquanto é permitida a passagem dos fluidos neste mesmo plano.

As aberturas dos geossintéticos que desempenham esta função deverão ser adequadas, para que não haja colmatação durante o tempo de vida da estrutura onde o material está instalado.

Estes geossintéticos deverão também possuir a flexibilidade necessária para um bom ajuste com o solo envolvente, impedindo a migração de partículas para os vazios que seriam criados entre o solo e o geossintético.

A função de filtro pode ser desempenhada por geossintéticos em duas situações distintas: para evitar o arrastamento de partículas em suspensão em fluidos percolantes ou para, no interior de maciços terrosos, permitir a passagem de águas mas impedindo a passagem de partículas sólidas,

Protecção

A função de protecção consiste em evitar ou limitar a danificação de um determinado elemento ou material através do recurso a um geossintético.

O geossintético protege o outro material quando colocado na interface entre dois materiais, permitindo a absorção e distribuição de tensões ou deformações que seriam aplicadas ao material a ser protegido. Quando os geossintéticos exercem funções de protecção, é importante assegurar uma espessura adequada, assim como a continuidade do material.

Reforço

A função de reforço consiste na utilização de geossintéticos de forma a melhorar as propriedades mecânicas de um solo ou de outro material de construção.

Os geossintéticos exercem função de reforço essencialmente em duas situações: (1) quando são colocados entre duas camadas sujeitas a pressões diferentes e a sua tensão equilibra a diferença de pressão entre essas camadas, conduzindo ao reforço global; (2) quando são colocados no interior de maciços para suportar tensões de tracção, aumentando a capacidade global da estrutura para resistir a este tipo de esforços. A função de reforço requer que os geossintéticos possuam propriedades mecânicas adequadas, tanto no momento da instalação, como ao longo do tempo.

Separação

A função de separação consiste em evitar a mistura de dois materiais adjacentes, com características diferentes, através da colocação de um geossintético entre eles.

A barreira sintética é introduzida entre os dois materiais com granulometrias diferentes, impedindo que estes se misturem ou interpenetrem. Desta forma é assegurado o funcionamento e a integridade de ambos os materiais, evitando que estes se misturem ou interpenetrem sob acção das cargas aplicadas.

Controlo de erosão superficial

Esta função consiste na utilização de um geossintético para evitar ou limitar os movimentos de solo ou de outras partículas na superfície de, por exemplo, um talude.

Esta função pode ser desempenhada de forma provisória ou permanente: (1) forma provisória – quando são usados geossintéticos biodegradáveis até à consolidação da estrutura, por exemplo, pelo crescimento da vegetação; (2) forma permanente - por exemplo, para prevenir a erosão costeira.

Barreira de fluídos

A função de barreira consiste em utilizar um geossintético para evitar a migração de fluidos (líquidos ou gases).

Estes geossintéticos não devem sofrer danos durante as operações de transporte, manuseamento e instalação.

Para exercer esta função, os geossintéticos têm de ser impermeáveis e contínuos, devendo ser assegurada a correcta ligação entre as diferentes faixas dos materiais.

Estes geossintéticos devem ser resistentes aos ataques químicos que os fluidos possam originar.

2.6 – APLICAÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS

As principais aplicações dos geossintéticos, são referidas na norma EN ISO 10318:2005 e apresentam-se de forma esquemática na Figura 2.7.

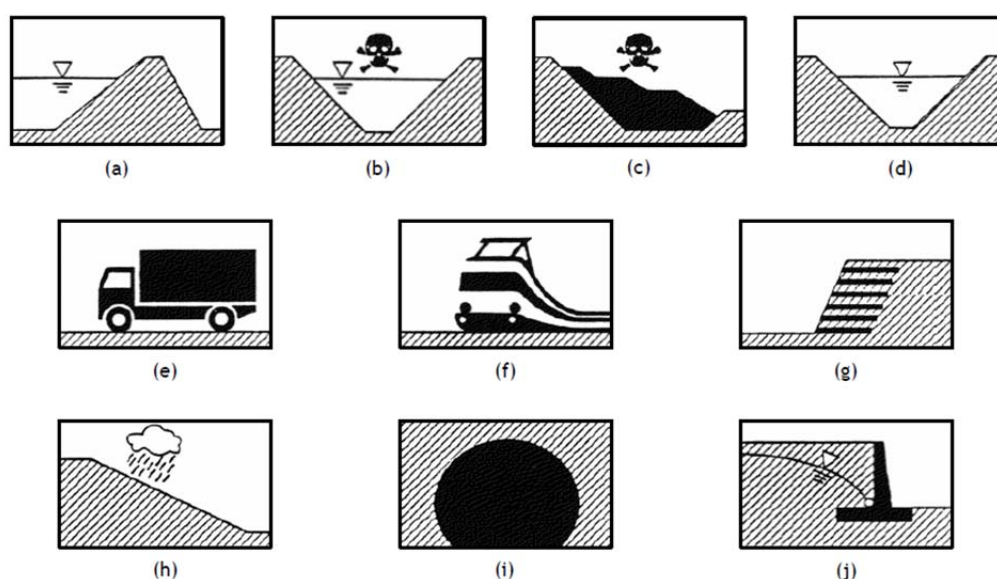



Fig. 2.7 – Principais aplicações dos geossintéticos (EN ISO 10318:2005):(a) Reservatórios e barragens; (b) Depósitos de resíduos líquidos; (c) Depósitos de resíduos sólidos; (d) Canais; (e) Obras rodoviárias; (f) Obras ferroviárias; (g) Fundações e estruturas de suporte; (h) Sistemas de controlo da erosão; (i) Túneis e estruturas subterrâneas; (j) Sistemas de drenagem.

Nos Quadros 2.3 a 2.6 são apresentados os domínios de utilização, funções desempenhadas e os principais tipos de aplicação dos geossintéticos, respectivamente em: obras marítimas, obras hidráulicas, vias de comunicação e obras de engenharia ambiental.

Quadro 2.3 - Aplicações dos geossintéticos em obras marítimas (adaptado de Giroud et al., 1985).

Domínios de Utilização	Funções	Tipos de Aplicação
Costas. Portos	Filtragem	Protecção da costa: filtros entre os solos naturais e enrocamento de protecção
Costas. Portos	Controlo de erosão	Colchões de geotêxtil envolvendo solo ou betão: controlo de erosão. Sacos de geotêxtil com solo para controlo de erosão em fundações subaquáticas
Moldes	Envolvimento	Colchões de geotêxtil envolvendo solo ou betão: controlo de erosão. Sacos de geotêxtil com solo como moldes na construção de fundações debaixo de água. Moldes subaquáticos de tapetes de betão. Reparação de fundações em estruturas marítimas.

Quadro 2.4 - Aplicações dos geossintéticos em obras hidráulicas (adaptado de Giroud et al., 1985).

Domínios de Utilização	Funções	Tipos de Aplicação
Barragens de terra	Drenagem, filtragem, controlo de erosão, separação.	Tela drenante no núcleo da barragem. Protecção do paramento de jusante. Separação entre o material de enchimento e o enrocamento superior de protecção (paramento de montante). Envolvimento de drenos de brita.
Rios. Canais. Reservatórios, Lagos	Filtragem, controlo de erosão, envolvimento	Filtro entre o solo natural das margens e o enrocamento superior de protecção. Controlo de erosão; sacos de geotêxtil com solo.
Bases de reservatórios	Acção mecânica de membrana, protecção, drenagem, barreira de fluidos. Controlo de erosão	Efeito de “ponte” sobre zonas moles ou não suportadas, sob as membranas. Protecção das geomembranas (rasgamento ou perfuração). Drenagem de fluidos (gases ou líquidos), sob as geomembranas. Impermeabilização.
Canais, Valas, Rios	Controlo de erosão	Prevenção da erosão em superfícies subaquáticas.

Quadro 2.5 - Aplicações dos geossintéticos em vias de comunicação (adaptado de Giroud et al., 1985).

Domínios de Utilização	Funções	Tipos de Aplicação
Aterros	Drenagem, filtragem, controlo de erosão, separação, reforço, acção mecânica de membrana	Dreno horizontal entre o aterro e os solos saturados da fundação; filtro durante a consolidação. Separação dos solos moles e dos materiais do aterro. Reforço na base. Acção mecânica de membrana ("ponte" entre os solos moles)
Estabilização e protecção de taludes	Filtragem, controlo de erosão, reforço, envolvimento	Filtro entre os solos do aterro e dispositivos de protecção dos taludes. Geossintéticos colocados sobre os taludes, prevenindo a erosão. Sacos, com solo ou betão, protegendo os taludes. Reforços de taludes instáveis, com cortes e enchimentos.
Muros. Estruturas de suporte de terras	Reforço, envolvimento	Muros de terra reforçados. Taludes reforçados e protegidos.
Pavimentos sobre solos moles	Reforço, acção mecânica de membrana, separação, filtragem, drenagem.	Reforço dos solos moles da base ("ponte" sobre materiais moles). Separação dos materiais do pavimento e dos solos moles da base. Filtragem e drenagem dos solos saturados da base.
Reabilitação de pavimentos	Protecção, barreira de fluidos.	Geossintéticos colocados entre camadas dos pavimentos, inibindo a propagação de fendas.
Vias férreas (novas e reabilitadas)	Separação, reforço, drenagem, filtragem.	Separação do balastro e do material de aterro; reforço do sistema de distribuição das cargas.
Túneis	Protecção, drenagem, barreira de fluidos.	Protecção das geomembranas (barreiras de fluidos); drenagem das águas.
Drenagem	Filtragem, controlo de erosão, reforço, envolvimento.	Filtros envolvendo drenos de areia ou britas e condutas.

Quadro 2.6 - Aplicações dos geossintéticos em obras de engenharia ambiental (adaptado de Giroud et al., 1985).

Domínios de Utilização	Funções	Tipos de Aplicação
Aterros sanitários	Reforço, controlo de erosão, drenagem, barreira de fluidos.	Reforço e controlo de erosão de taludes. Drenagem de líquidos. Impermeabilização.
Lagos	Filtragem, protecção, drenagem, barreira de fluidos.	Filtros em sistemas de protecção das margens. Prevenção de rasgamento ou perfuração das geomembranas. Drenagem de gases e líquidos sob as geomembranas. Impermeabilização.
Dunas de areia	Controlo de erosão, barreira ao transporte de partículas ou sedimentos.	Estabilização de dunas face à acção do vento (barreiras de areia ou silte).
Canais. Valas. Rios	Barreira ao transporte de partículas ou sedimentos.	Minimização da migração de partículas sólidas em suspensão.
Passagens subterrâneas de água. Saída de canalizações. Valas drenantes.	Barreira ao transporte de partículas ou sedimentos.	Prevenção do transporte de partículas sólidas em suspensão.

3

ENSAIOS LABORATORIAIS

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feita uma descrição dos ensaios realizados, equipamento utilizado para a realização dos mesmos, sendo também apresentado o programa de ensaios adoptado.

A descrição dos geossintéticos ensaiados, assim como as suas principais características físicas e mecânicas são igualmente apresentadas neste capítulo.

3.2. MATERIAIS ENSAIADOS

Os materiais utilizados foram geocompósitos de reforço, constituídos por um geotêxtil não tecido agulhado de polipropileno (PP) reforçado com filamentos de poliéster (PET) numa direcção (reforço unidireccional). Devido ao reforço unidireccional o material apresenta aspectos distintos entre faces, sendo uma das faces com filamentos em PET enquanto a outra não tem filamentos de PET (ver Fig. 3.1 e Fig. 3.2).

a)

b)

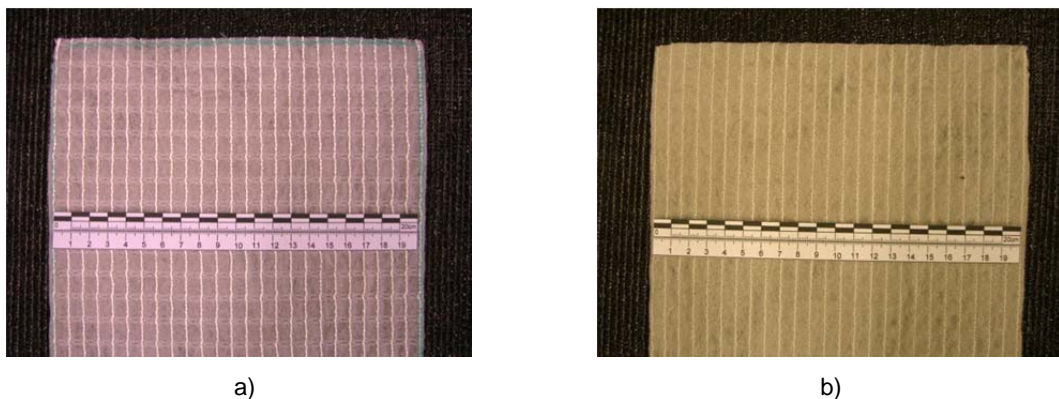



Fig. 3.1 – Geocompósito com reforço unidireccional de PET (GC50): a) Face com filamentos de PET; b) Face sem filamentos de PET.

a)

b)

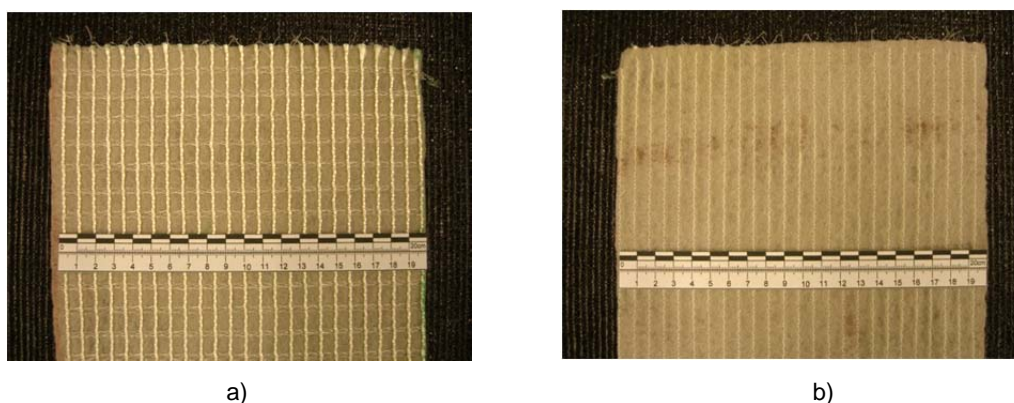



Fig. 3.2 – Geocompósito com reforço unidireccional de PET (GC100): a) Face com filamentos de PET; b) Face sem filamentos de PET.

Foram estudados dois geocompósitos com reforço unidireccional de PET, um com resistência nominal à tracção na direcção de fabrico de 50 kN/m (designado por GC50) e outro com um valor dessa resistência na mesma direcção de 100 kN/m (designado por GC100).

No Quadro 3.1 apresenta-se a ficha técnica dos geocompósitos utilizados nos ensaios.

Refira-se que algumas das propriedades mecânicas são variáveis consoante a direcção de solicitação do geocompósito, pelo que na Figura 3.3 são apresentadas as duas direcções possíveis de ensaio, direcção de fabrico e direcção perpendicular à de fabrico.

Quadro 3.1 – Ficha técnica dos geocompósitos ensaiados (GC50 e GC100)

Propriedade			GC 50	GC100
Resistência à tracção (EN ISO 10319)	DF	KN/m	63	115
	Tolerância	KN/m	-3	-5
	DPF	KN/m	14	14
	Tolerância	KN/m	n.a.	n.a.
Elongação na carga máxima (EN ISO 10319)	DF	KN/m	13	13
	Tolerância	KN/m	+/-3	+/-3
	DF	KN/m	n.a.	n.a.
	Tolerância	KN/m	n.a.	n.a
Rigidez Secante				
a 2%	DF	KN/m	7,6	13,9
a 5%	DF	KN/m	22,1	40,4
a 10%	DF	KN/m	47,3	86,6
(EN ISO 10319)				
Dimensão aparente dos poros (O90) (EN ISO 12956)		µm	95	95
Permissividade (EN ISO 11058)		mm/s l/m^2s	65	65
Transmissividade (20 kPa) (EN ISO 12958)		$10^{-7}m^2/s$	30	30
Espessura (2KPa) (EN 964-1)		mm	2,1	2,4
Massa por unidade de área (EN 965)		g/m^2	310	370

DF – Direcção de Fabrico
DPF – Direcção Perpendicular à de Fabrico

a)

b)

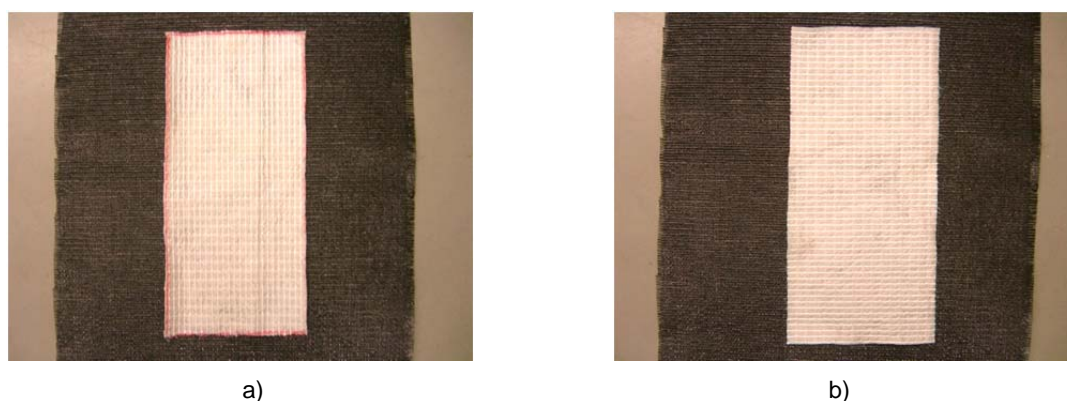



Fig. 3.3 – Direcções de ensaio possíveis: a) Direcção de fabrico; b) Direcção perpendicular à de fabrico.

3.3. PROGRAMA DE ENSAIOS REALIZADO

O programa de ensaios adoptado consistiu na realização de 4 tipos de ensaios: massa por unidade de área, tracção-extensão, abrasão e abrasão precedido de punçoamento dinâmico.

No Quadro 3.2 apresenta-se o número de provetes ensaiados por cada tipo de ensaio.

Quadro 3.2 – Programa de Ensaios

Ensaio	Número de provetes ensaiados		
		GC 50	GC 100
Massa por unidade de área (NP EN ISO 9864:2006)		10	10
Tracção Extensão (NP EN ISO 10319)	DF	5	5
	DPF	5	5
Abrasão Face com filamentos de PET (NP EN ISO 13427:2006)	DF	5	5
	DPF	5	5
Abrasão Face sem filamentos de PET (NP EN ISO 13427:2006)	DF	2	2
	DPF	2	2
Punçoamento dinâmico (NP EN ISO 13433:2008) + Abrasão Face com filamentos de PET (NP EN ISO 13427:2006)	DF	5	5
	DPF	5	5

As propriedades mecânicas, das quais se salientam a resistência à tracção, extensão na força máxima, rigidez secante e robustez obtidas pelo ensaio de tracção-extensão dos materiais intactos, serão utilizadas como valores de referência por forma a avaliar a influência da abrasão e da abrasão precedida de punçoamento dinâmico nestas propriedades.

Por forma a identificar os provetes a ensaiar foram marcados, com uma caneta de feltro, os seguintes elementos:

- Geocompósito ensaiado (RP50 e RP100, respectivamente, para designar o GC50 e o GC100);
- Tipo de ensaio realizado (para o ensaio de tracção não foi utilizada nenhuma marcação, para o ensaio de abrasão utilizou-se A, para o ensaio de abrasão precedido de punçoamento dinâmico PA);
- Direcção de fabrico dos materiais (utilizou-se uma seta vertical ↑ para designar a direcção de fabrico e uma seta horizontal → para designar a direcção perpendicular à de fabrico). A seta representa a orientação dos filamentos de poliéster (PET).

Na Figura 3.4 apresentam-se exemplos das marcações utilizadas para a identificação dos provetes.

a)

b)

Fig. 3.4 – Exemplo de marcações utilizadas para identificação dos provetes: a) GC50 – Abrasão - Direcção de fabrico; b) GC100 – Tracção - Direcção perpendicular à de fabrico.

3.4. PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS

Nesta secção são descritos os procedimentos adoptados para a realização de cada um dos ensaios, assim como dos equipamentos utilizados em cada um deles.

3.4.1. MASSA POR UNIDADE DE ÁREA (NP EN ISO 9864:2006)

Para a determinação da massa por unidade de área foi utilizada a norma NP EN ISO 9864:2006 (Geossintéticos. Ensaio para a determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados).

A referida norma prevê a determinação da massa por unidade de área através da pesagem de pelo menos 10 provetes, quadrados ou circulares, cortados de posições distribuídas em toda a largura e todo o comprimento da amostra.

Os provetes deverão ter uma área nominal de 100 cm^2. Caso a estrutura do produto for tal que 100 cm^2 não seja representativo será necessário utilizar provetes com maiores dimensões.

Em produtos com aberturas de malha relativamente grandes (tais como geogrelhas e georredes) devem ser cortados a meio de duas ligações dos seus elementos constituintes. O provete deve incluir, no mínimo, 5 elementos constituintes em ambas as direcções, devendo a sua área ser determinada para cada provete individualmente.

Nos ensaios realizados foi utilizado o seguinte procedimento:

- Cortaram-se 10 provetes quadrados com 10 cm de lado aproximadamente, garantindo-se que em todos eles havia o mesmo número de filamentos de PET, pois a variação dos mesmos influencia o peso do provete;
- Determinou-se a área de cada um dos provetes, medindo dois lados perpendiculares entre si com uma craveira com precisão de 0,05 mm;
- Pesou-se cada um dos provetes com uma balança analítica (marca AND, modelo HF 300G) (capacidade máxima 310g; precisão de 0,001g).

A Figura 3.5 ilustra o procedimento e equipamentos utilizados na realização deste ensaio.

a) b) c)

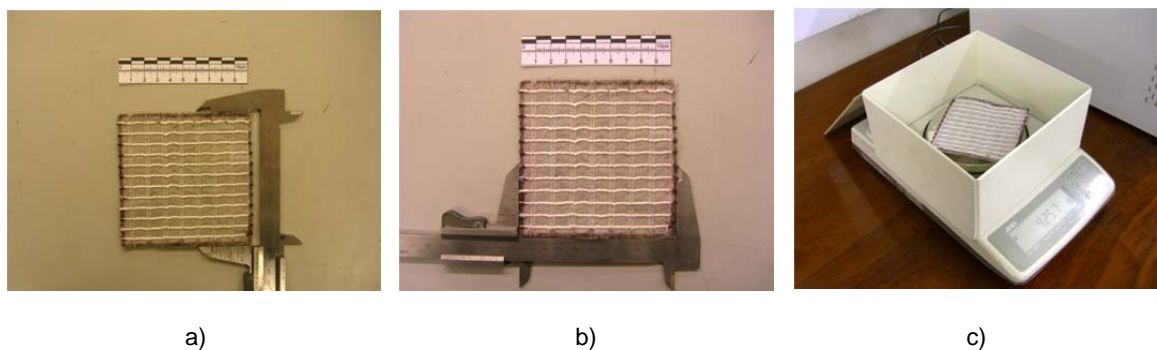



Fig. 3.5 – Determinação da massa por unidade de área de um geocompósito: a) Medição de um dos lados do provete; b) Medição do lado do provete perpendicular ao primeiro; c) Pesagem do provete.

Os resultados obtidos e respectiva análise encontram-se no Capítulo 4.

3.4.2. Ensaio de tracção-extensão (NP EN ISO 10319:2005)

Para a realização do ensaio de tracção-extensão seguiu-se a norma NP EN ISO 10319:2005 (Geotêxteis – Ensaio de tracção em tiras largas).

Este método de ensaio é aplicável à maioria dos geotêxteis, incluindo tecidos, não-tecidos, geocompósitos, tricotados e feltros. O método é também aplicável a geogrelhas, mas as dimensões dos provetes poderão necessitar de alterações.

Neste método de ensaio é registada a carga-extensão de um provete submetido a uma velocidade de extensão constante. A velocidade de extensão é fixada em 20±5% por minuto.

A norma prevê a utilização de provetes com 200 mm de largura e 100 mm de comprimento. Adoptando uma largura superior ao comprimento reduz-se o efeito de contracção lateral (“neck down”) patente em alguns geotêxteis quando submetidos a cargas. Segundo a norma deverão ser ensaiados no mínimo cinco provetes na direcção de fabrico e cinco na direcção perpendicular à de fabrico.

Para a realização deste ensaio foi utilizada uma máquina de ensaio universal (marca LLOYD INSTRUMENTS, modelo LR50K) (Figura 3.6). As características desta máquina encontram-se no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Características da máquina de ensaio universal (LLOYD INSTRUMENTS, LR50K).

Características	**Valores**
Força máxima (tensão e compressão)	50 kN
Amplitude global da força	0,1 – 50 kN
Erro na medição da força	Igual ou inferior a 1%
Velocidade de ensaio	0,01– 500 mm.min-1
Exactidão na aplicação da velocidade	± 0,5% do valor definido
Largura máxima de trabalho	400 mm
Extensão máxima de trabalho	1000 mm (excluindo as garras)

Fig. 3.6 – Máquina de ensaio universal (LLOYD INSTRUMENTS, LR50K).

Esta máquina, controlada por computador através de um programa especialmente desenvolvido para o efeito, permite ensaiar o provete com a aplicação de uma velocidade de extensão fixa definida pelo utilizador.

O programa regista os pares de valores força-extensão medidos pela máquina, traça a curva força-extensão e regista a força máxima atingida pelo provete assim como a correspondente extensão na força máxima.

Para a fixação dos provetes, a máquina permite a instalação de 4 tipos de garras (existentes no laboratório), sendo que o tipo de garra a ser utilizada dependerá do material a ser ensaiado devendo garantir dois aspectos: não permitir o deslizamento do provete durante o ensaio e não danificar o

provete durante a fixação do mesmo à garra. A danificação do provete durante a fixação às garras originaria um ponto frágil o qual levaria à rotura precoce do mesmo.

Na Figura 3.7 apresentam-se os 4 tipos de garras existentes no laboratório.

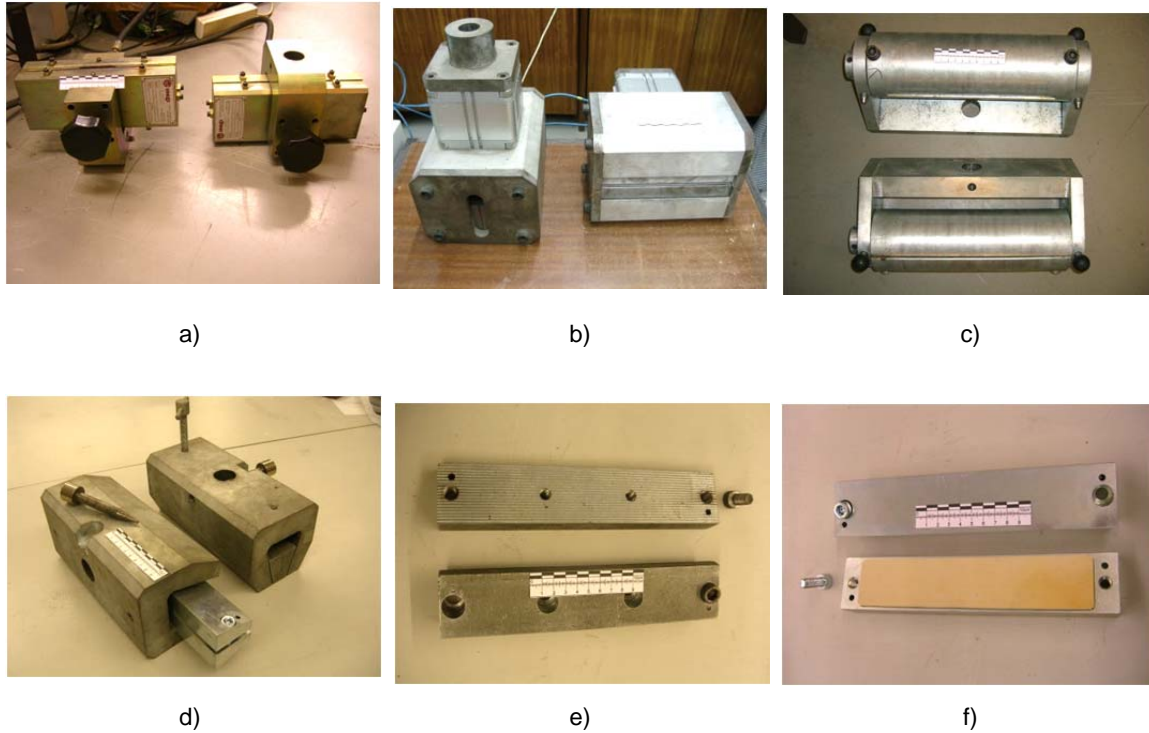



Fig. 3.7 – Garras disponíveis no Laboratório de Geossintéticos da FEUP: a) Garras de compressão hidráulica; b) Garras de compressão pneumática; c) Garras cilíndricas; d) Suporte das garras em cunha; e) Cunha metálica com face rugosa; f) Cunha metálica com face de borracha.

Para a medição dos valores de força, a máquina permite a instalação de 3 células de carga (existentes no laboratório), sendo que a célula de carga a utilizar deverá ser escolhida por forma a assegurar que a rotura do provete ocorra entre os 30% e os 90% da força máxima permitida pela célula.

Na Figura 3.8 apresentam-se as 3 células de carga existentes no laboratório.

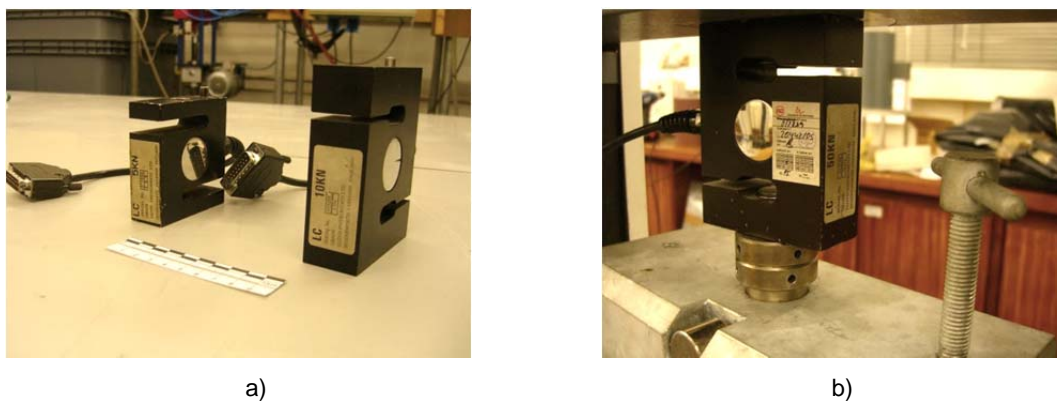



Fig. 3.8 – Células de carga: a) Células de 5 kN e 10 kN; b) Célula de 50 kN.

A medição da extensão dos provetes pode ser feita por duas vias: por medição do deslocamento relativo das garras durante o ensaio, ou por via óptica através da utilização de um vídeo extensómetro. Refira-se que em ambos os casos, o comprimento nominal (distância inicial de separação das garras) é fixado em 100 mm, sendo a aquisição de dados durante o ensaio feita automaticamente através do programa que controla a máquina.

Em todos os ensaios realizados a extensão foi medida através do deslocamento das garras, sendo o seu registo feito automaticamente pelo programa que controla a máquina de ensaio universal.

Na medição da extensão não foi utilizado o vídeo extensómetro uma vez que a utilização do mesmo implica a fixação de pontos de referência no provete, afastados 60 mm entre si (30 mm acima e abaixo do centro de simetria do provete). A fixação destes pontos nos provetes ensaiados ao punçoamento dinâmico iria conduzir a resultados falseados, uma vez que a fixação de um qualquer ponto de referência poderia coincidir com a zona na qual foi induzida a danificação por via do ensaio de punçoamento. Sendo o objectivo deste trabalho estabelecer uma comparação entre valores da resistência à tracção entre provetes intactos e provetes danificados optou-se pela medição da extensão através do deslocamento das garras uma vez que este método pode ser usado em todos os provetes utilizados.

3.4.2.1. Ensaio de tracção-extensão com material intacto

No ensaio realizado foi utilizado o seguinte procedimento:

- Cortaram-se 5 provetes na direcção de fabrico e 5 provetes na direcção perpendicular à de fabrico, tendo o cuidado de garantir que em cada amostra (conjunto de 5 provetes) definida pela direcção, o número de filamentos de PET em cada provete era idêntico aos restantes que compunham a amostra. Desta forma tentou-se garantir a semelhança entre os provetes que compõem a amostra, uma vez que uma diferença de número de filamentos de PET conduz a resultados distintos, quer ao nível da resistência à tracção, quer ao nível da extensão para a carga máxima;
- Os provetes foram cortados com 200 (largura) x 340 (comprimento) mm^2. A norma prevê a utilização de provetes com 100 mm de comprimento entre garras, no entanto para garantir a fixação do provete às garras foi necessário deixar um excedente ao nível do comprimento. Constatou-se que a realização do ensaio com garras de compressão hidráulica ou com as garras de cunha metálica com face rugosa permitiam o escorregamento dos provetes ensaiados impedindo que se atingisse a resistência máxima à tracção do material, pelo que foi adoptado o método de fixação utilizado por Vieira 2008, que nos pontos seguintes se descreve;
- Marcaram-se duas linhas horizontais a toda a largura, equidistantes do centro do provete por forma a garantir os 100 mm entre garras requeridos pela norma;

  Na zona de fixação às garras de cunha foi aplicado um barramento de cola e colocado um varão de aço liso, com 4 mm de diâmetro, a dividir esta zona em duas partes iguais. Seguidamente dobrou-se a zona de fixação às garras conforme se mostra na Figura 3.9. A cola utilizada diferiu mediante o geocompósito ensaiado. Para o ensaio do GC50 utilizou-se uma cola normal (Pattex, cola de contacto) sendo que no ensaio do GC100 foi utilizada uma cola especial (3M Scoth-Weld, adesivo de contacto universal). Refira-se que se experimentou usar a cola normal no ensaio do GC100, mas constatou-se que a mesma não impedia o escorregamento do provete, uma vez que a resistência à tracção deste geocompósito é superior

à do GC50. Face a esta constatação e seguindo as indicações do fabricante utilizou-se a cola especial.

Fig. 3.9 – Ensaio de tracção provetes intactos: a) Provete para ensaio à tracção; b) Molde em cartão utilizado para o corte dos provetes; c) Aplicação da cola; d) Dobragem do provete na zona de fixação às garras; e) Aspecto final do provete a ser ensaiado.

- Colocou-se o provete nas cunhas metálicas com face rugosa (Figura 3.10), tendo-se fixado o provete às mesmas através do aperto dos parafusos nas extremidades. A fixação através dos parafusos centrais não foi efectuada dado que iria danificar o provete;

Fig. 3.10 – Ensaio de tracção provetes intactos: a) Provete nas cunhas metálicas com face rugosa (vista da face com filamentos de PET); b) Provete nas cunhas metálicas com face rugosa (vista da face sem filamentos de PET).

- Colocou-se o conjunto cunhas metálicas/provete no suporte das garras em cunha previamente instalado na máquina de ensaio (Figura 3.11a), tendo o cuidado de assegurar que o provete ficava centrado relativamente a este suporte por forma a garantir que a carga é aplicada uniformemente em toda a largura do provete. Refira-se que o conjunto cunhas metálicas/provete deve estar fixo ao suporte das garras no início do ensaio pois caso contrário quando o mesmo iniciar, existe o risco da cunha metálica inferior balançar, deixando de ficar centrada com o suporte das garras. Caso esta situação se verifique, a distribuição de carga no provete não é feita em toda a sua largura mas apenas numa parte o que pode conduzir a resultados errados;
- Calibrou-se a distância entre as cunhas metálicas para os 100 mm (Figura 3.11b);

a)

b)

Fig. 3.11 – Ensaio de tracção provetes intactos: a) Cunhas metálicas no suporte das garras; b) Calibração da distância entre as cunhas metálicas.

- Definiu-se no programa que controla a máquina de ensaio a razão de extensão para 20 mm/min, por forma a cumprir a norma de ensaio;
- Iniciou-se o ensaio verificando-se o afastamento das garras a velocidade constante até ocorrer a rotura do provete (Figura 3.12). Após a rotura, as garras regressam à sua posição original, sendo que esta distância deverá ser sempre confirmada antes da realização de novo ensaio;

a) b) c)

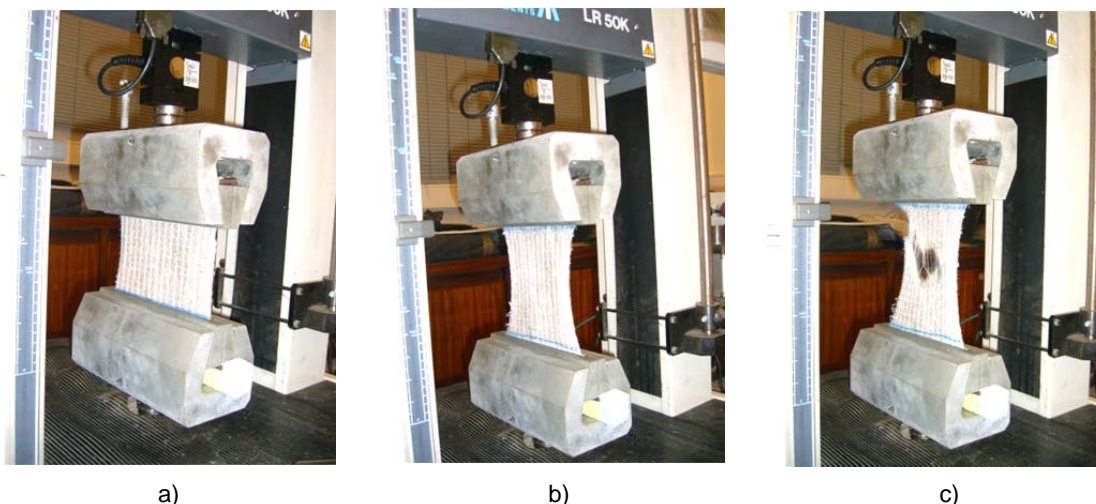



Fig. 3.12 – Ensaio de tracção provetes intactos: a) Início do ensaio; b) Durante a aplicação de carga; c) Rotura do provete.

- Armazenaram-se, em suporte informático, os pares de valores força-extensão registados pela máquina de ensaio para tratamento dos mesmos mediante as indicações da norma de ensaio seguida.

Os resultados obtidos e respectiva análise encontram-se no Capítulo 4.

3.4.2.2. Ensaio de tracção-extensão a provetes submetidos à abrasão

No ensaio realizado foi utilizado o seguinte procedimento:

- Cortaram-se 5 provetes na direcção de fabrico e 5 provetes na direcção perpendicular à de fabrico, tendo o cuidado de garantir que em cada amostra (conjunto de 5 provetes) definida pela direcção, o número de filamentos de PET em cada provete era idêntico aos restantes que compunham a amostra;
- Os provetes foram previamente ensaiados à abrasão (ver ponto 3.4.3), tendo para o efeito sido cortados com 200 (largura) x 430 (comprimento) mm^2 (Figura 3.13);

  Após o ensaio de abrasão foi ajustado o comprimento dos provetes por forma a cumprirem a dimensão prevista na norma de ensaio de tracção-extensão, ou seja 100 mm mais um excedente para a fixação do provete às garras (Figura 3.13). Uma vez que as garras utilizadas neste ensaio foram garras de compressão hidráulica os provetes ficaram com a dimensão de 200 (largura) x 300 (comprimento) mm^2.
- Marcaram-se duas linhas horizontais a toda a largura, equidistantes do centro do provete por forma a garantir os 100 mm requeridos pela norma;

a) b) c)

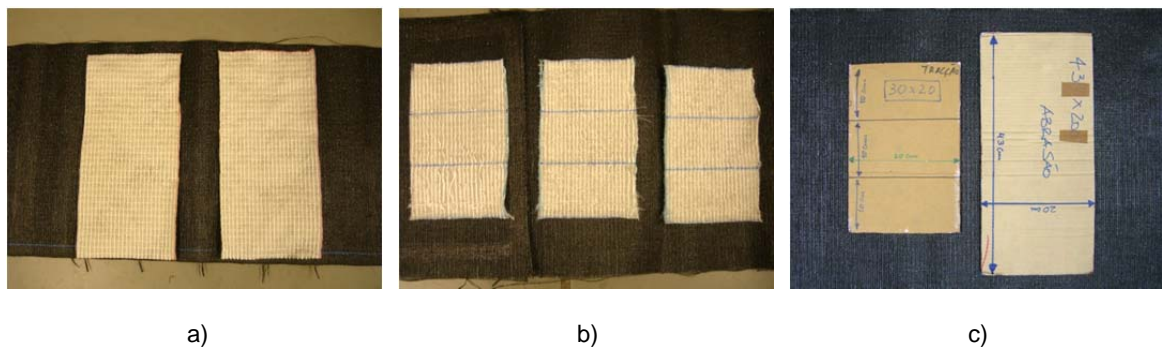



Fig. 3.13 – Ensaio de tracção a provetes submetidos à abrasão: a) Dimensão do provete para ensaio à abrasão; b) Dimensão do provete para ensaio à tracção (após abrasão); c) Moldes em cartão utilizados para o corte dos provetes ensaiados à abrasão e à tracção

- Colocou-se o provete nas garras de compressão hidráulica (Figura 3.14a), previamente instaladas na máquina de ensaio, tendo o cuidado de garantir que o provete ficava centrado relativamente às garras por forma a que a carga seja aplicada uniformemente em toda a largura do provete;
- Calibrou-se a distância entre as garras para os 100 mm (Figura 3.14b);

a) b)

Fig. 3.14 - Ensaio de tracção a provetes submetidos à abrasão: a) Provete nas garras de compressão hidráulica; b) Calibração da distância entre as garras de compressão hidráulica.

- Definiu-se no programa que controla a máquina de ensaio a razão de extensão para 20 mm/min, de acordo com a norma de ensaio;
- Iniciou-se o ensaio verificando-se o afastamento das garras a velocidade constante até ocorrer a rotura do provete. Após a rotura, as garras regressam à sua posição original, sendo que esta distância deverá ser sempre confirmada antes da realização de novo ensaio (Figura 3.15);

a)

b)

c)

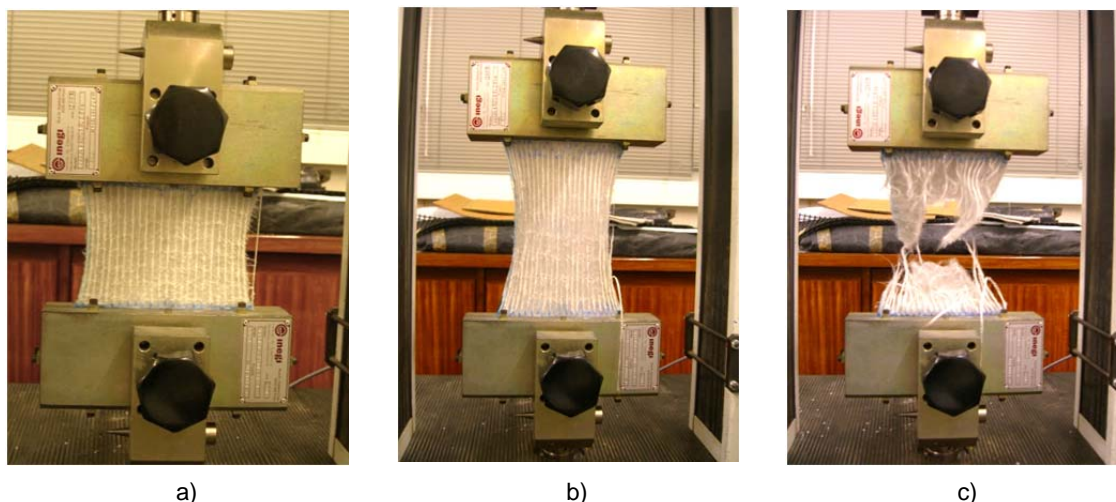



Fig. 3.15 – Ensaio de tracção a provetes submetidos à abrasão: a) Início do ensaio; b) Durante a aplicação de carga; c) Rotura do provete.

- Armazenaram-se, em suporte informático, os pares de valores força-extensão registados pela máquina de ensaio para tratamento dos mesmos, de acordo com a norma seguida.

Os resultados obtidos e respectiva análise encontram-se no Capítulo 4.

3.4.2.3. Ensaio de tracção a provetes submetidos à abrasão precedidos de punçoamento dinâmico

No ensaio realizado foi utilizado o seguinte procedimento:

- Cortaram-se 5 provetes na direcção de fabrico e 5 provetes na direcção perpendicular à de fabrico, tendo o cuidado de garantir que em cada amostra (conjunto de 5 provetes) definida pela direcção, o número de filamentos de PET em cada provete era idêntico aos restantes que compunham a amostra;
- Os provetes foram inicialmente submetidos ao ensaio de punçoamento dinâmico (ver ponto 3.4.4), e seguidamente ao ensaio de abrasão (ver ponto 3.4.3). Uma vez que a dimensão dos provetes requerida pelo ensaio de punçoamento dinâmico é inferior à dimensão dos provetes ensaiados à abrasão, os provetes foram cortados com 200 (largura) x 430 (comprimento) mm^2;

  Após o ensaio de abrasão foi ajustado o comprimento dos provetes por forma a cumprirem a dimensão prevista na norma de ensaio de tracção-extensão, ou seja 100 mm mais um excedente para a fixação do provete às garras. Uma vez que as garras utilizadas neste ensaio foram garras de compressão hidráulica os provetes ficaram com a dimensão de 200 (largura) x 300 (comprimento) mm^2;
- Marcaram-se duas linhas horizontais a toda a largura, equidistantes do centro do provete por forma a garantir os 100 mm requeridos pela norma;
- Colocou-se o provete nas garras de compressão hidráulica, previamente instaladas na máquina de teste universal tendo o cuidado de garantir que o provete ficava centrado relativamente às garras, por forma a garantir que a carga é aplicada uniformemente em toda a largura do provete;

- Calibrou-se a distância entre as garras para os 100 mm;
- Definiu-se no programa que controla a máquina de ensaio a razão de extensão para 20 mm/min, de acordo coma norma de ensaio seguida;
- Iniciou-se o ensaio verificando-se o afastamento das garras a velocidade constante até ocorrer a rotura do provete. Após a rotura, as garras regressam à sua posição original, sendo que esta distância deverá ser sempre confirmada antes da realização de novo ensaio (Figura 3.16);

a)

b)

c)

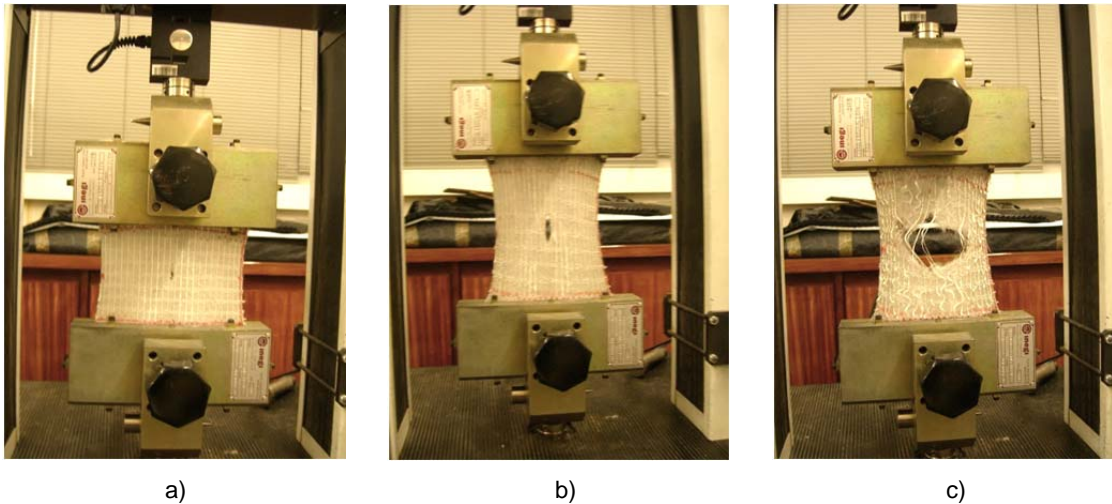



Fig. 3.16 – Ensaio de tracção a provetes submetidos à abrasão precedidos de punçoamento dinâmico: a) Início do ensaio; b) Durante a aplicação de carga; c) Rotura do provete.

- Armazenaram-se, em suporte informático, os pares de valores força-extensão registados pela máquina de ensaio para tratamento dos mesmos, de acordo com a norma de ensaio.

Os resultados obtidos e respectiva análise encontram-se no Capítulo 4.

No Quadro 3.4 apresenta-se um resumo dos procedimentos usados para o ensaio de tracção-extensão mediante o tipo de geocompósito ensaiado e o tipo de provete ensaiado (intacto, submetido a abrasão, submetido à abrasão precedido de punçoamento dinâmico).

Quadro 3.4 – Procedimento para o ensaio de tracção-extensão

	Ensaio de tracção por tipo de Provete						
	Intacto			**Abrasão**		**Punçoamento Dinâmico Abrasão**	
	Dimensão do provete	Garras	Cola	Dimensão do provete	Garras	Dimensão do provete	Garras
GC50	340 x 200	Cunha metálica + Varão de aço	Normal	Abrasão 430 x 200 Tracção 300 x 200	Hidráulicas	Punc. Dinâmico + Abrasão 430 x 200 Tracção 300 x 200	Hidráulicas
GC100	340 x 200	Cunha metálica + Varão de aço	Especial	Abrasão 430 x 200 Tracção 300 x 200	Hidráulicas	Punc. Dinâmico + Abrasão 430 x 200 Tracção 300 x 200	Hidráulicas

Em todos os ensaios de tracção-extensão, anteriormente descritos, deve-se aferir se o ensaio pode ser validado ou deve ser rejeitado, mediante a análise da rotura do provete.

Caso se verifique o escorregamento dos provetes nas garras, ou a rotura do provete junto a estas por danos provocados pelas próprias garras então o ensaio deverá ser considerado nulo (Figura 3.17). No entanto, a rotura do provete junto às garras pode dever-se ao facto de, por coincidência, esta zona do provete ser a zona menos resistente do mesmo. Outra razão que poderá levar à rotura do provete junto às garras é o facto de nesta zona haver uma concentração de tensões uma vez que as garras impedem que os provetes diminuam de largura nesta zona durante a aplicação da carga. Em ambas as situações anteriormente descritas o ensaio deverá ser considerado válido.

A norma refere, na ausência de outro critério para rejeitar uma rotura do provete na zona das garras, que qualquer rotura de provete que ocorra até 5 mm das garras, resultando num valor inferior a 50% dos valores médios das roturas de todos os outros provetes, deve ser rejeitado.

a)

b)

Fig. 3.17 – Exemplos de ensaios rejeitados: a) Escorregamento dos provetes nas garras; b) Rotura do provete junto às garras.

3.4.3. ENSAIO DE ABRASÃO (NP EN ISO 13427:2006)

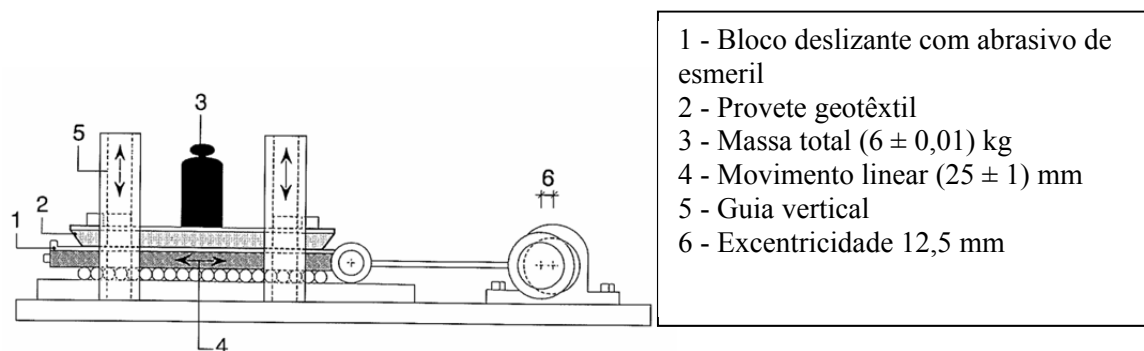
Para a realização do ensaio de abrasão seguiu-se a norma NP EN ISO 13427:2006 (Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão – ensaio de bloco deslizante (ISO 13427:1998).

Este método de ensaio aplica-se a geotêxteis tecidos e não tecidos e produtos relacionados.

O ensaio tem por base a colocação de um provete num prato fixo, para este ser friccionado por um material abrasivo cujas características superficiais (abrasivas) são especificadas.

No equipamento laboratorial utilizado, o material abrasivo é movido ao longo de um eixo horizontal com um movimento uniaxial, em condições controladas de pressão e acção abrasiva.

O equipamento laboratorial utilizado e as suas características são apresentados na Figura 3.18.

1 - Bloco deslizante com abrasivo de esmeril
2 - Provete geotêxtil
3 - Massa total (6 ± 0,01) kg
4 - Movimento linear (25 ± 1) mm
5 - Guia vertical
6 - Excentricidade 12,5 mm

a)

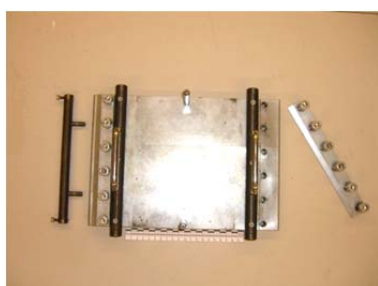
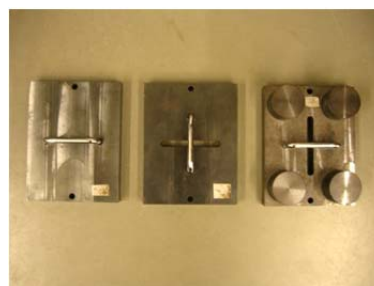
b)

c) d) e)

Fig. 3.18 – Equipamento laboratorial utilizado para a realização do ensaio de abrasão pelo método do bloco deslizante: a) Descrição do aparelho de ensaio; b) Vista geral; c) Prato superior (estacionário); d) Prato inferior (vaivém); e) Pesos.

A norma NP EN ISO 13427:2006 prevê que a resistência à abrasão seja avaliada pelo ensaio de tracção através do método da tira estreita (NP EN ISO 13934–1:2001), no entanto para diminuir o efeito de contracção lateral que se verifica nos provetes ensaiados através desta norma e também para uniformizar a norma de tracção-extensão em todos os ensaios realizados, o ensaio de tracção-extensão foi efectuado pela norma NP EN ISO 10319:2005 (ensaio de tracção para tiras largas).

Assim sendo, visto que esta norma prevê a utilização de provetes com 200 mm de largura, os provetes de geotêxtil para o ensaio de abrasão foram cortados com as dimensões 430 (comprimento) x 200 (largura) mm^2, sendo a maior dimensão correspondente à direcção na qual se pretende simular a abrasão. Refira-se que o comprimento do provete (430 mm) é condicionado pelas dimensões do prato superior 330 (comprimento) x 220 (largura) mm^2 no qual é colocado o geocompósito a ensaiar. O

abrasivo, a ser colocado no prato inferior, tem dimensões de 385 (comprimento) x 220 (largura) mm^2 (Figura 3.19).

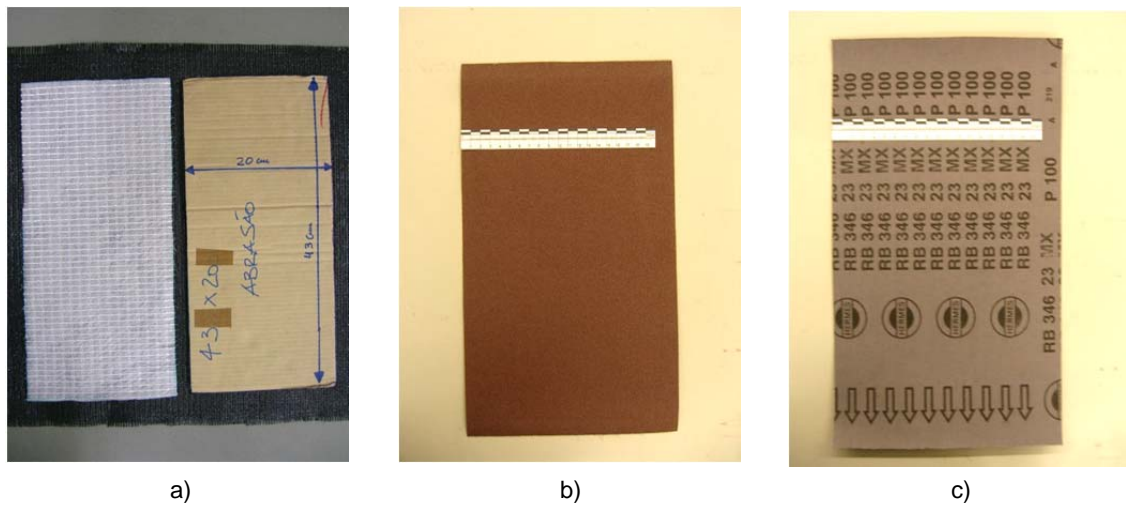



Fig. 3.19 – Geocompósito e Abrasivo: a) Provete para ensaio à abrasão e respectivo molde em cartão utilizado para o seu corte; b) Abrasivo (face em contacto com o provete); c) Abrasivo (face em contacto com o prato inferior).

Após a montagem dos provetes no equipamento laboratorial (conforme descrito a seguir), o equipamento é programado para efectuar 90 ciclos/minuto até serem completados 750 ciclos. Cada ciclo é composto por uma passagem dupla do prato inferior (vaivém), sendo o comprimento linear de cada passagem de 25±1 mm, perfazendo um total de 50±2 mm por ciclo.

Os provetes são de seguida ensaiados à tracção seguindo a norma NP EN ISO 10319:2005, anteriormente descrita.

O procedimento para a realização do ensaio de abrasão é apresentado de seguida.

Dado que ambos os geocompósitos ensaiados apresentam faces diferentes, o procedimento a seguir descrito, apesar de ser idêntico para ambos os geocompósitos (GC 50 e GC 100), é diferenciado entre a face com filamentos de PET e a face sem filamentos de PET:

- Face com filamentos de PET - Cortaram-se 5 provetes na direcção de fabrico e 5 provetes na direcção perpendicular à de fabrico, tendo o cuidado de garantir que em cada amostra (conjunto de 5 provetes) definida pela direcção, o número de filamentos de PET em cada provete era idêntico aos restantes que compunham a amostra;
- Face com filamentos de PET - Os provetes foram cortados com 430 (comprimento) x 200 (largura) mm^2 sendo a maior dimensão a correspondente à direcção na qual se pretendia efectuar o ensaio;
- Face sem filamentos de PET - Cortaram-se 2 provetes na direcção de fabrico e 2 provetes na direcção perpendicular ao fabrico, tendo o cuidado de garantir que em cada amostra (conjunto de 2 provetes) definida pela direcção, o número de filamentos de PET em cada provete era idêntico aos restantes que compunham a amostra;
- Face sem filamentos de PET - Os provetes foram cortados com 430 (comprimento) x 200 (largura) mm^2 sendo a maior dimensão a correspondente à direcção na qual se pretendia

efectuar o ensaio. Neste caso, e tendo em linha de conta que é a face sem filamentos de PET a ser ensaiada, o facto da maior dimensão ser a correspondente à direcção na qual se pretendia efectuar o ensaio não é relevante, mas de forma a estabelecerem-se comparações adoptou-se o critério utilizado para a face com filamentos de PET;

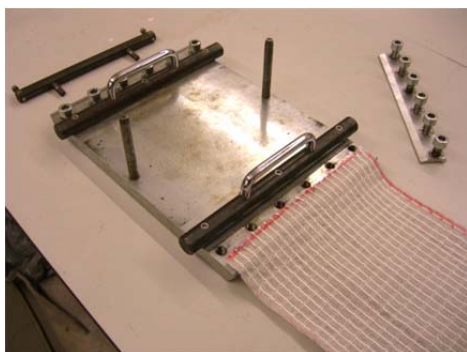
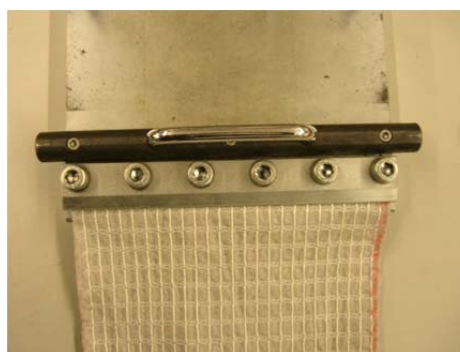
- Cortaram-se 14 películas abrasivas com dimensão 385 (comprimento) x 220 (largura) mm^2. A película abrasiva utilizada foi uma lixa de esmeril com abrasivo P100;
- A fixação do provete é feita no prato superior, iniciando-se pelo lado que não possui esticador (Figura 3.20). O provete é alinhado ao centro do prato, sob a garra, por forma a garantir que a distância entre o bordo do prato e o bordo do provete é equidistante em ambos os lados. Após a colocação do provete na posição anteriormente descrita apertam-se os 6 parafusos da garra garantindo-se desta forma a fixação de um lados do provete ao prato;

a)

b)

Fig. 3.20 – Fixação do provete no prato superior (lado sem esticador): a) Colocação do provete com bordos equidistante; b) Provete após fixação.

- Seguidamente o provete deverá acompanhar a face lisa do prato por forma a ser fixo à extremidade na qual se encontra o esticador (Figura 3.21). À semelhança do referido atrás, o provete deverá ser colocado sob as garras garantindo a equidistância entre bordos. Os parafusos de regulação do esticador deverão estar desapertados de forma a garantir o total encosto do esticador com o prato. Isto permite utilizar o esticador em toda a sua extensão de forma a eliminar mais eficazmente as folgas entre o provete e o prato. Seguidamente apertam-se os 6 parafusos da garra garantindo-se a fixação do provete ao prato;

a)

b)

Fig. 3.21 – Fixação do provete ao prato superior (lado com esticador): a) Colocação do provete com bordos equidistante; b) Provete após fixação com esticador encostado ao prato.

- A fixação do provete ao prato superior termina com o aperto alternado dos parafusos do esticador. Esta acção provoca o afastamento do esticador relativamente ao prato, esticando ao máximo o provete. Este procedimento, ao eliminar as folgas entre o provete e o prato evita que o prato superior se desloque relativamente ao provete;

  Na Figura 3.22 é exemplificada a colocação do provete para ensaio da face com filamentos de PET e da face sem filamentos de PET.

a) b)

c) d)

Fig. 3.22 – Fixação do provete no prato superior (lado com esticador): a) Esticador com parafusos de ajuste desapertados; b) Esticador com parafusos de ajuste apertados; c) Ensaio da face com filamentos de PET; d) Ensaio da face sem filamentos de PET.

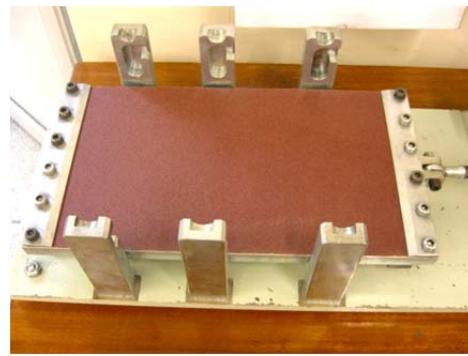
- Coloca-se uma película de abrasivo no prato inferior, colocando as extremidades da mesma sob as garras da plataforma. Para se fixar a película de abrasivo ao prato apertam-se os 6 parafusos de cada uma das garras de fixação (Figura 3.23);

a) b)

Fig. 3.23 – Fixação da película de abrasivo no prato inferior: a) Película abrasiva no prato; b) Aperto dos parafusos nas garras de fixação.

- Coloca-se o prato superior (estacionário) alinhado com o prato inferior (vaivém);
- Colocam-se os 3 níveis de peso em cima do prato superior por forma a perfazer 6±0.01 kg;

- Programa-se a caixa de aquisição do equipamento para a realização dos 750 ciclos, sendo que o equipamento assegura de forma automática a frequência de 90 ciclos por minuto. Inicia-se o ensaio (Figura 3.24);

a)

b)

Fig. 3.24 – Equipamento laboratorial: a) Início do ensaio; b) Caixa de Aquisição.

- Terminado o ensaio, retira-se o provete de forma a não provocar qualquer danificação adicional;
- Uma vez que que o provete é de seguida ensaiado à tracção-extensão (com garras hidráulicas) corta-se o provete de forma a ajustá-lo para a dimensão de 300 (comprimento) x 200 (largura) mm^2;
- Substitui-se a película abrasiva por uma nova.

Se durante a realização do ensaio de abrasão, houver deslizamento do provete ou da película abrasiva das garras, o mesmo deverá ser rejeitado (Figura 3.25). Realça-se que o deslizamento da película abrasiva não é tão fácil de detectar podendo acontecer que o mesmo só seja detectado após ser removido o prato superior no final do ensaio.

a)

b)

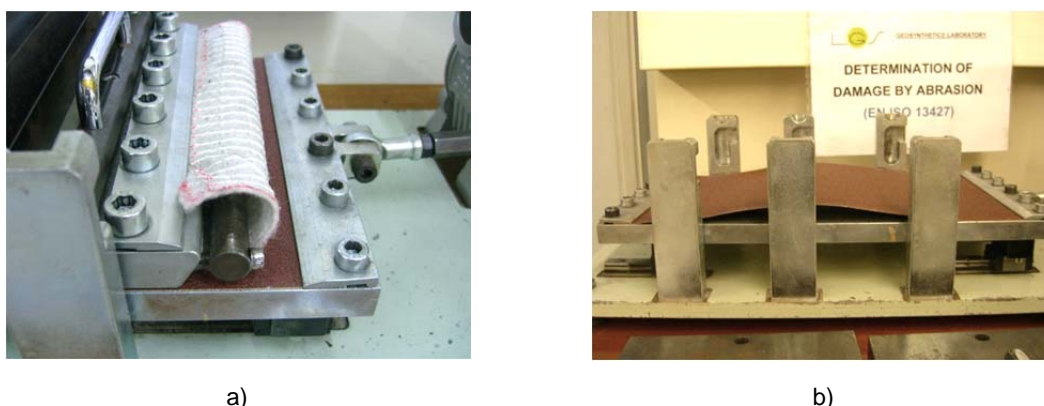



Fig. 3.25 – Exemplos de ensaios rejeitados: a) Deslizamento do provete das garras; b) Deslizamento da película abrasiva das garras.

Os resultados obtidos e respectiva análise encontram-se no Capítulo 4.

3.4.4. Ensaio de punçoamento dinâmico (NP EN ISO 13433:2008)

Para a realização do ensaio de punçoamento dinâmico seguiu-se a norma NP EN ISO 13433:2008 (Geossintéticos – Ensaio de perfuração dinâmica (ensaios com queda de cone)).

Este método de ensaio aplica-se a geossintéticos, no entanto a utilização deste ensaio para alguns produtos deverá ser considerada cuidadosamente, uma vez que o ensaio poderá não ser exequível, por exemplo, para as geogrelhas.

O ensaio tem por base a fixação de um provete entre dois anéis. Seguidamente é largado um cone em aço inox (com arestas a 45º e massa de 1000±5 g) de uma altura de 500 mm no centro do provete. Mede-se o diâmetro do furo através da introdução no mesmo de um cone graduado. O cone graduado mede o diâmetro do furo até um máximo de 50±0,1 mm, apresenta um comprimento total de 200±0,1 mm e cada divisão do mesmo corresponde a um incremento do diâmetro de 2 mm.

O equipamento laboratorial, acima descrito, é apresentado na Figura 3.26:

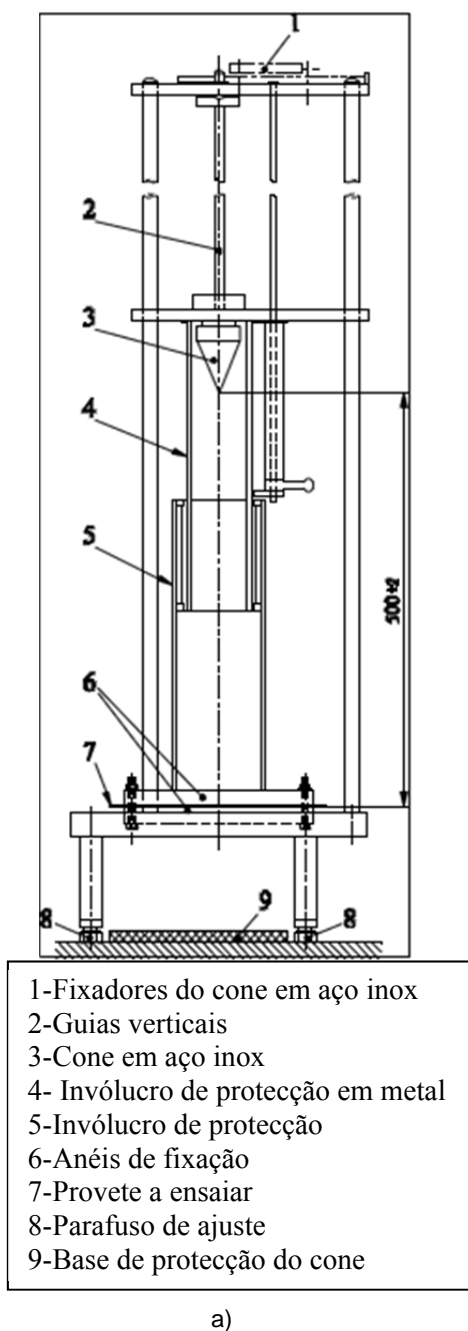



Fig. 3.26 – Equipamento laboratorial utilizado para a realização do ensaio de punçoamento dinâmico: a) Descrição do aparelho de ensaio; b) Anéis de fixação do provete; c) Cone em aço inox; d) Cone graduado.

Segundo a norma NP EN ISO 13433:2008 o diâmetro interno dos anéis deverá ser de 150±0,5 mm tendo o sistema de fixação como finalidade evitar o deslizamento do provete quando este é punçoado pelo cone em aço inox. Para tal, a norma estabelece que os anéis deverão ser providos de uma zona com relevo por forma a aumentar a aderência quando um anel é pressionado contra o outro.

A fixação de um anel ao outro é feita por intermédio de 8 parafusos, o que implica que coincidente com os orifícios dos parafusos, o provete tenha de ser cortado com diâmetro idêntico a estes por forma a permitir a sua passagem.

Visto nos ensaios realizados o ensaio de punçoamento dinâmico ser seguido do ensaio de abrasão, sendo a dimensão do provete deste último 430 (comprimento) x 200 (largura) mm^2, ou seja superior aos 150 mm de diâmetro interno dos anéis, foi necessário arranjar um método alternativo de fixação do provete aos anéis de forma a evitar os 8 orifícios no provete na zona dos parafusos, pois se tal fosse executado iria invalidar a utilização do provete no ensaio de abrasão.

Seguidamente é apresentado o procedimento utilizado para a realização do ensaio de punçoamento dinâmico:

- Cortaram-se 5 provetes na direcção de fabrico e 5 provetes na direcção perpendicular à de fabrico, tendo o cuidado de garantir que em cada amostra (conjunto de 5 provetes) definida pela direcção, o número de filamentos de PET em cada provete era idêntico aos restantes que compunham a amostra;
- Os provetes foram cortados com 430 (comprimento) x 200 (largura) mm^2 sendo a maior dimensão a correspondente à direcção na qual se pretendia efectuar o ensaio. Estas dimensões não são requeridas pela norma de ensaio de punçoamento dinâmico, mas visto os provetes serem posteriormente ensaiados à abrasão são adoptadas estas dimensões uma vez que são superiores às dimensões dos provetes previstos para o ensaio de punçoamento dinâmico;
- Desliza-se, através das guias verticais, o involucro de protecção até à base superior do equipamento. Desta forma fica acessível a base inferior na qual se irão desenvolver os trabalhos subsequentes;
- Coloca-se um dos anéis, com a parte com relevo virada para cima, no equipamento de ensaio;
- Coloca-se o provete sobre este anel, de forma a garantir que a área definida pelo diâmetro interno do anel é totalmente preenchida pelo provete (Figura 3.27a). Deverá também assegurar-se que, nesta área, o provete não fica com pregas ou dobras;
- Coloca-se o outro anel, com a parte com relevo em contacto com o provete, alinhado com o anel anteriormente colocado (Figura 3.27b);
- Fixa-se o provete aos anéis através de dois grampos de aperto rápido colocados em dois pontos opostos (Figura 3.27c). Com este método de fixação evita-se a perfuração do provete na zona dos 8 parafusos, o que inviabilizaria a utilização do provete no ensaio de abrasão;

a) b) c)

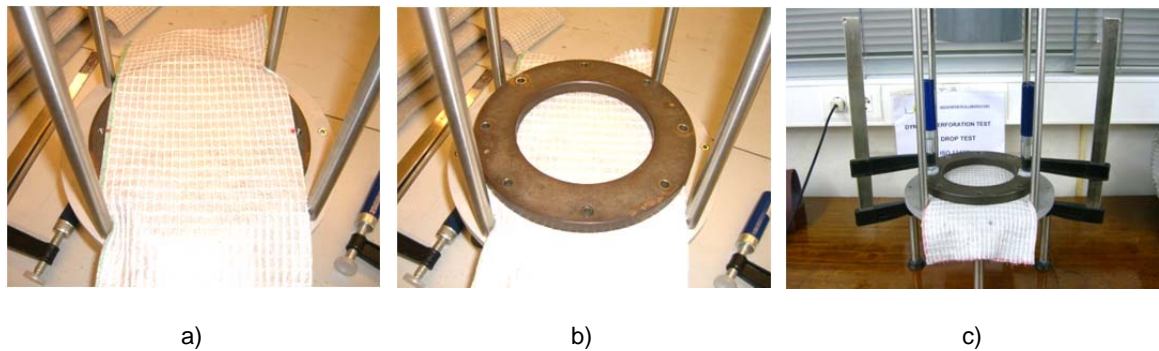



Fig. 3.27 – Fixação do conjunto anéis de fixação/provete: a) Colocação do provete sobre o primeiro anel; b) Colocação do segundo anel; c) Grampos de fixação.

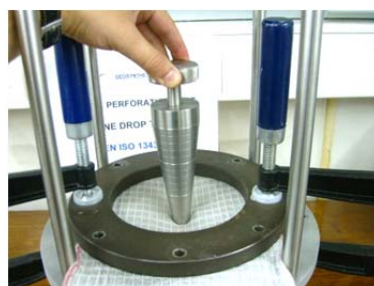
- Desliza-se, através das guias verticais, o involucro de protecção até à base inferior do equipamento. Desta forma fica acessível a base superior na qual se irão desenvolver os trabalhos subsequentes;
- Coloca-se o cone em aço inox nas garras do equipamento (Figura 3.28a). Desta forma é garantida a distância de 500 mm desde o vértice do cone à superfície do provete;
- Libertam-se as garras, através do aperto das patilhas, de forma a libertar o cone em aço inox, permitindo a queda livre deste até ao provete (Figura 3.28b);
- Desliza-se, através das guias verticais, o involucro de protecção até à base superior do equipamento;
- Retira-se o cone em aço inox e coloca-se de imediato o cone graduado para medir o diâmetro do furo (Figura 3.28c). O cone graduado deve ser colocado na vertical e baixado gradualmente até preencher na totalidade o furo, aguardando-se 10s. Mede-se o diâmetro do furo através das marcações do cone graduado. Ter em atenção que, durante a medição com o cone graduado, não deverá ser aplicada nenhuma pressão extra, uma vez que esta poderá aumentar o diâmetro do furo.

a) b) c)

Fig. 3.28 – Ensaio de punçoamento dinâmico: a) Cone nas garras do equipamento (antes da queda); b) Cone (após a queda); c) Medição do diâmetro do furo obtido com o cone graduado.

Os resultados obtidos e respectiva análise encontram-se no Capítulo 4.

4
ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foram descritos os procedimentos associados a cada um dos ensaios realizados.

Neste capítulo é feita a apresentação dos resultados obtidos em cada um dos ensaios e a análise desses resultados por forma a determinar qual a influência de cada uma das danificações nas propriedades do material ensaiado.

4.2. ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA MASSA POR UNIDADE DE ÁREA

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos no ensaio de determinação da massa por unidade de área dos geocompósitos considerados, seguindo a norma NP EN 9864:2006.

De acordo com a referida norma, a massa por unidade de área, ρ_A, de cada provete (em g/m^2) é calculada através da seguinte expressão:

$$\rho_A = \frac{m \times 10000}{A} \tag{4.1}$$

na qual:

- m é a massa do provete (em g);
- A é área do provete (em cm^2).

A amostra é constituída, no mínimo por 10 provetes e os resultados são apresentados em termos de valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação da amostra.

Nos Quadros 4.1 e 4.2 apresentam-se os valores da massa por unidade de área dos 10 provetes dos geocompósitos GC50 e GC100 ensaiados, respectivamente, bem como o valor médio deste parâmetro, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Quadro 4.1 – Massa por unidade de área dos provetes ensaiados para o geocompósito GC50.

GC 50	**Lado 1** (cm)	**Lado 2** (cm)	**Área** (cm^2)	**Massa** (g)	**ρ_A** (g/m^2)
Provete 1	10,420	10,310	107,43	3,434	320
Provete 2	10,320	10,180	105,06	3,587	341
Provete 3	10,350	10,120	104,74	3,870	369
Provete 4	10,130	10,110	102,41	3,706	362
Provete 5	10,360	10,050	104,12	3,705	356
Provete 6	10,230	10,312	105,49	3,579	339
Provete 7	10,140	10,140	102,82	3,354	326
Provete 8	10,210	10,188	104,02	3,396	326
Provete 9	10,220	10,350	105,78	3,329	315
Provete 10	9,920	10,300	102,18	3,292	322
Média	10,230	10,206	104,41	3,525	338
Desvio Padrão	0,15	0,10	1,65	0,19	19,13
Coef. Variação (%)	1,42	1,02	1,58	5,50	5,66

Quadro 4.2 – Massa por unidade de área dos provetes ensaiados para o geocompósito GC100.

GC 100	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (cm^2)	Massa (g)	ρ_A (g/m^2)
Provete 1	10,286	10,240	105,33	4,474	425
Provete 2	10,400	10,390	108,06	4,702	435
Provete 3	10,370	10,200	105,77	4,496	425
Provete 4	10,314	10,200	105,20	4,385	417
Provete 5	10,286	10,374	106,71	4,155	389
Provete 6	10,320	10,270	105,99	4,260	402
Provete 7	10,400	10,156	105,62	4,211	399
Provete 8	10,410	10,300	107,22	4,272	398
Provete 9	10,330	10,148	104,83	4,261	406
Provete 10	10,150	10,230	103,83	4,480	431
Média	10,327	10,251	105,86	4,370	413
Desvio Padrão	0,08	0,08	1,22	0,17	15,88
Coef. Variação (%)	0,75	0,81	1,15	3,85	3,85

O valor médio da massa por unidade de área do geocompósito GC50 é de 338g/m^2, apresentando um desvio padrão de 19,13g/m^2 e um coeficiente de variação de 5,66%. No que se refere ao geocompósito GC100 o valor médio da massa por unidade de área é de 413g/m^2, o desvio padrão é de 15,88g/m^2 e um coeficiente de variação de 3,85%.

4.3. ENSAIO DE TRACÇÃO - EXTENSÃO

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos no ensaio de tracção a provetes intactos dos geocompósitos em estudo, seguindo a norma NP EN ISO 10319:2005.

Segundo esta norma os resultados obtidos no ensaio de tracção deverão incluir os seguintes parâmetros:

- Resistência à tracção;
- Extensão na carga máxima;
- Rigidez secante a 2%, 5%, 10% e optativamente para ε_{Fmax} (extensão na força máxima);
- Robustez (parâmetro optativo).

Deverá ser feita uma análise estatística dos resultados obtidos a qual é composta pelo cálculo do valor médio, do desvio padrão e do coeficiente de variação da amostra ensaiada.

Refira-se que uma amostra terá de ser constituída por um mínimo de 5 provetes em cada direcção de ensaio.

4.3.1. RESISTÊNCIA À TRACÇÃO

A resistência à tracção, T, de um geossintético (em kN/m) pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$T = F_{max} \times C \quad (4.2)$$

na qual:

- F_{max} é a força máxima (em kN) registada durante o ensaio de tracção-extensão;
- C é um parâmetro obtido a partir das Expressões 3.3 ou 3.4, conforme se demonstra abaixo.

Para geotêxteis não-tecidos, tecidos de malha apertada ou materiais similares com uma largura nominal de provete B (em metros):

$$C = \frac{1}{B} \quad (4.3)$$

Para geotêxteis tecidos de malha larga, georredes, geogrelhas ou materiais semelhantes com uma estrutura aberta:

$$C = \frac{N_m}{N_s} \quad (4.4)$$

em que N_m é o número mínimo de elementos (barras, filamentos ou fitas) existentes num metro de largura do material e N_S é o número de elementos existentes no provete sujeito ao ensaio de tracção-extensão.

No caso em estudo e uma vez que o principal constituinte dos geocompósitos analisados é um geotêxtil não tecido considerou-se para o cálculo a Expressão 4.3.

Por aplicação desta equação e sendo B igual a 0,20m, obtemos:

$$C = \frac{1}{B} = \frac{1}{0.2} = 5 \quad (4.5)$$

4.3.2. EXTENSÃO NA CARGA MÁXIMA

A extensão de um provete, ε (expressa em %), em qualquer momento do ensaio de tracção-extensão pode ser determinada a partir da seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \qquad (4.6)$$

na qual:

- L é a distância entre dois pontos de referência (distância entre faces das pegas na ausência de um extensómetro) no momento escolhido do ensaio;
- L_0 é a distância inicial de referência.

A extensão na força máxima, ε_{Fmax} (em %), é a extensão apresentada pelo geossintético no momento em que a força atinge o seu valor máximo. A ε_{Fmax} pode ser calculada através da Expressão 4.6, substituindo o parâmetro L pelo parâmetro L_{Fmax} (distância entre os dois pontos de referência no momento em que foi atingida a força máxima).

No caso em estudo, tendo-se constatado que para a distância entre as faces das pegas prevista na norma, 100 mm, eram vários os provetes que não se encontravam sob tensão optou-se por considerar o valor L_0 como a distância entre as faces das pegas após o ajuste das mesmas. (ver 4.3.5).

O facto de ter havido provetes que para a distância entre as faces das pegas previstas na norma, 100 mm, não se encontrarem sob tensão deve-se a factores, tais como:

- A maleabilidade dos geocompósitos ensaiados, a qual afecta as dimensões no intervalo de tempo decorrido entre a altura em que provete foi colhido do rolo e a altura em que o provete foi ensaiado;
- O erro sistemático cometido pelo operador quando define a distância entre a face das pegas no equipamento usado;
- O erro sistemático cometido pelo operador quando coloca as linhas de referencia do provete coincidentes com a faces das pegas utilizadas.

4.3.3. Rigidez secante

A rigidez secante, J_{sec}, (expressa em kN/m) é calculada para uma extensão especificada, através da seguinte expressão:

$$J_{sec} = \frac{F_{\varepsilon} \times C}{\varepsilon} \times 100 \qquad (4.7)$$

na qual:

- F_{ε} é a força (em kN) determinada para uma extensão especificada ε (em %);
- C é determinado a partir das Expressões 4.3 ou 4.4, conforme o caso.

A norma do ensaio de tracção-extensão, NP EN ISO 10319:2005, prevê o cálculo desta grandeza para as seguintes extensões: 2%, 5%, 10% (Figura 4.1) e optativamente para valores individuais.

Por norma, não se calcula a rigidez secante para extensões acima dos 10%, dado que em situações reais a extensão dos geossintéticos dificilmente poderá atingir valores tão altos sem comprometer a estabilidade global da estrutura na qual estão inseridos.

No caso em estudo foi também calculada a rigidez secante para a extensão na força máxima (ε_{Fmax}) obtida em cada provete para melhor caracterização do material (Figura 4.1).

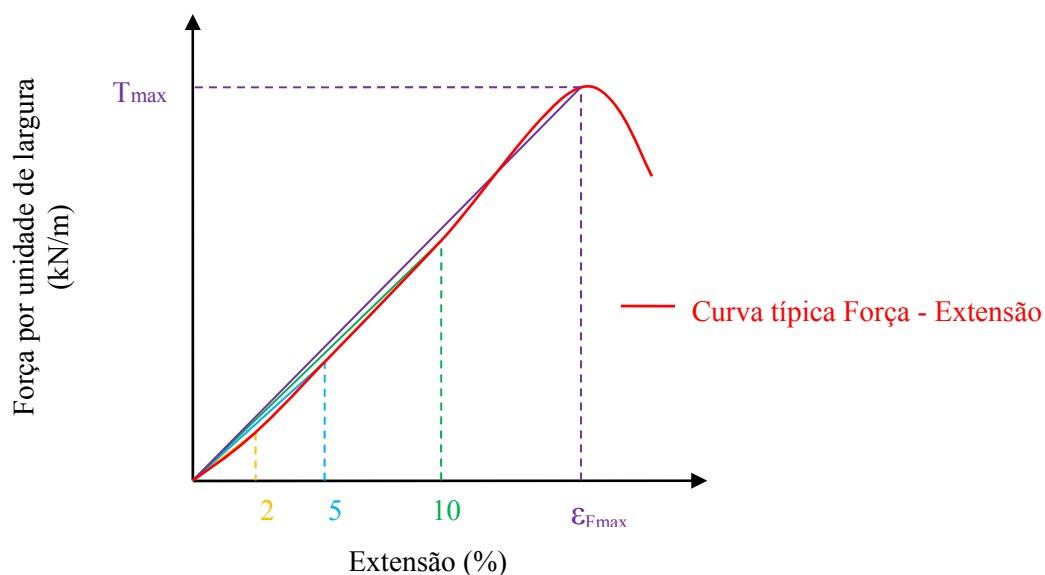



Fig. 4.1 – Representação gráfica da rigidez secante para a extensão de 2%, 5%, 10% e para ε_{Fmax} numa curva típica força – extensão.

4.3.4. Robustez

A robustez, W (expressa em kN/m ou kJ/m^2), é a energia máxima que um material pode absorver antes de ocorrer a sua rotura. A robustez pode também ser designada por potencial de absorção de energia.

Graficamente a robustez pode ser determinada pelo cálculo da área abaixo da curva força-extensão do material (Figura 4.2).

No caso em estudo foi calculada a robustez para cada um dos provetes ensaiados.

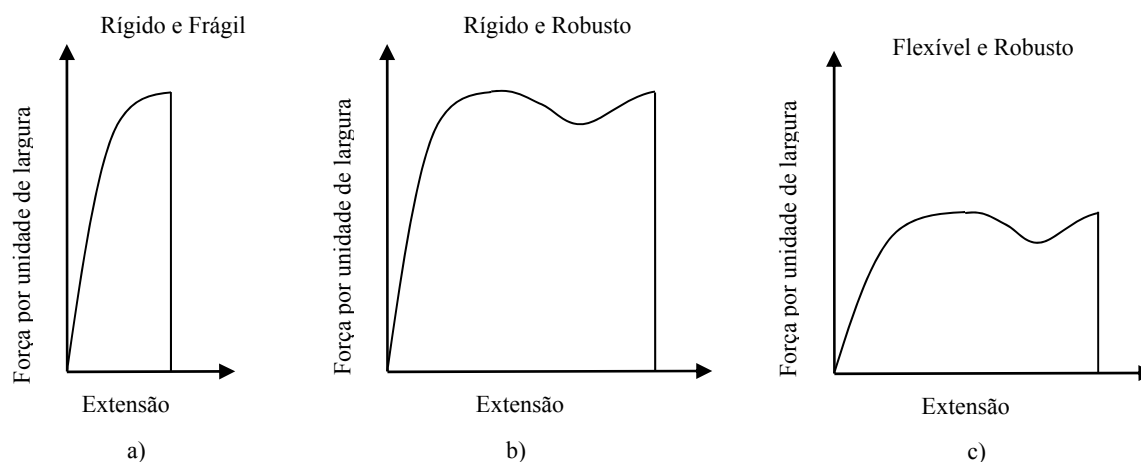



Fig. 4.2 – Curvas típicas força por unidade de largura - extensão de um material e respectiva classificação quanto à robustez: a) Rígido e Frágil; b) Rígido e Robusto; c) Flexível e Robusto

4.3.5. Ajuste das pegas

Nos ensaios de tracção é usualmente feito o ajuste das pegas no provete a ensaiar.

Este ajuste tem como objectivo garantir que o registo das forças - extensões tenha início numa fase para a qual o aumento da distância entre as faces das pegas (extensão), seja traduzido num aumento da força.

Graficamente, com o ajuste das pegas pretende-se eliminar o troço horizontal da curva força-extensão para o qual se verifica que ao aumento da extensão não corresponde um aumento da força por unidade de largura, mantendo este último parâmetro um valor igual a zero ou muito próximo disso.

A Figura 4.3 mostra as implicações do ajuste das pegas na extensão que, por sua vez, influenciam a rigidez secante e a robustez.

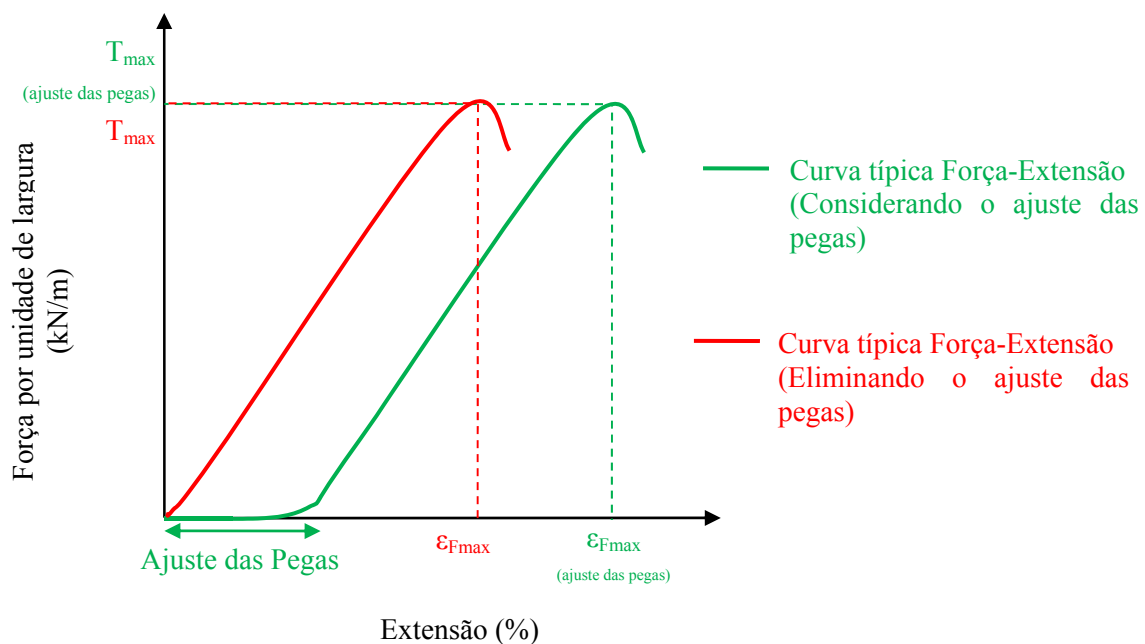



Fig. 4.3 – Influência do ajuste das pegas na extensão para duas curvas típicas força-extensão, na qual uma é idêntica à outra com excepção do troço referente ao ajuste das pegas.

Conforme se constata na figura a eliminação do troço do ajuste das pegas implica, que para a mesma curva força-extensão, se cheguem a valores distintos para os pares força por unidade de largura e extensão.

No caso em estudo, para os provetes ensaiados à tracção não foi definida qualquer distância padrão como ajuste de pegas na máquina de tracção. O ajuste de pegas para cada um dos provetes foi definido na fase de tratamento dos dados. O tratamento dos dados, processou-se da seguinte forma:

- Definição da fase de ajuste das pegas

  Para uma dado valor da força, registada pela máquina de tracção, se a diferença entre este valor e o consecutivo fosse inferior a 1 N considerava-se o valor pertencente à fase do ajuste das pegas. Note-se que este procedimento tem início no primeiro valor registado e termina assim que encontrada uma diferença entre valores consecutivos superior a 1N.

Desta forma garante-se que o troço horizontal no início da curva força-extensão seja incluído na fase de ajuste das pegas, sendo os valores registados após esta fase crescentes.

- Registo da distância entre pegas e da força de tracção

  Para o último valor da fase de ajuste das pegas, previamente definida, registar os valores da distância entre as faces das pegas e da força de tracção. Note-se que estes valores são dados pela máquina de tracção, pelo que as suas leituras são directas.

- Cálculo das extensões com distância inicial corrigida - $L_{0(\text{ajuste das pegas})}$

  O cálculo das extensões, para todos os valores após a fase de ajuste das pegas, deverá entrar em linha de conta com a distância entre as faces das pegas registada no ponto anterior, assim teremos a fórmula da extensão (Equação 4.6) com a respectiva adaptação:

$$\varepsilon = \frac{L - L_{0(\text{ajuste das pegas})}}{L_{0(\text{ajuste das pegas})}} \times 100 \qquad (4.8)$$

  $L_{0(\text{ajuste das pegas})}$ é a distância entre as faces das pegas registada para o último valor na fase de ajuste das mesmas.

  Note-se que este valor só por coincidência será idêntico ao valor previsto na norma, ou seja, 100 mm;

4.3.6. CURVA MÉDIA

Em cada ensaio de tracção, foram ensaiados 5 provetes em cada direcção de ensaio, tendo-se obtido para cada um deles uma curva força-extensão.

Por forma a facilitar a comparação entre os resultados obtidos para cada tipo de geocompósito e direcção de ensaio, determina-se a curva média do ensaio passando a amostra ensaiada a ser representada por uma só curva, em substituição das 5 curvas força-extensão correspondentes ao ensaio dos 5 provetes em cada direcção.

A curva média do ensaio obtém-se da seguinte forma:

Para cada curva força-extensão, resultante do ensaio de cada provete, é feita uma aproximação polinomial de grau 5. O coeficiente de determinação é também calculado por forma a avaliar o grau de semelhança entre a curva resultante da aproximação polinomial e a curva obtida pelos pares de valores força, extensão lidos na máquina de tracção.

Da equação da curva resultante da aproximação polinomial de cada provete, extraem – se os coeficientes an,i, calculando-se a média da amostra para cada um dos coeficientes.

$$F_{provete,i} = a_{5,i} \times x^5 + a_{4,i} \times x^4 + a_{3,i} \times x^3 + a_{2,i} \times x^2 + a_{1,i} \times x \qquad (4.9)$$

$$a_{n,i}^{médio} = \frac{\sum_{i=1}^{5} a_{n,i}}{5} \; para\ cada\ n\ entre\ 1\ e\ 5 \qquad (4.10)$$

Obtêm-se a curva média da amostra, através da utilização dos coeficientes médios previamente calculados.

$$F_{ensaio}^{média}=a_5^{médio}\times x^5+a_4^{médio}\times x^4+a_3^{médio}\times x^3+a_2^{médio}\times x^2+a_1^{médio}\times x \quad (4.11)$$

Para traçar a curva, atribuem-se valores crescentes a x, no intervalo compreendido entre zero e a média das extensões obtidas para a força máxima da amostra. Saliente-se que esta média de extensões é calculada a partir do par dos valores lidos pela máquina de tracção.

4.3.7. Apresentação de Resultados

A apresentação dos resultados dos ensaios tracção-extensão dos geocompósitos ensaiados, será dividida por tipo de geocompósito e direcção de ensaio.

Os resultados serão apresentados sob a forma de um gráfico força-extensão, sendo complementados por um quadro no qual estão indicadas as seguintes grandezas para cada um dos provetes ensaiados: resistência à tracção, extensão na força máxima, robustez e rigidez secante para 2%, 5%, 10%, ε_{Fmax} (em %).

Por forma a caracterizar a amostra em cada direcção de ensaio (conjunto de 5 provetes), foram calculadas as médias, desvios padrão e coeficientes de variação das grandezas anteriormente mencionadas, sendo estes resultados também apresentados nos quadros.

Por último, será apresentado um quadro no qual é feita a comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão.

4.3.7.1. Geocompósito GC50 – Direcção Perpendicular à de Fabrico (DPF)

Na Figura 4.4 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 5 provetes intactos do geocompósito GC50 na direcção perpendicular à de fabrico, abreviadamente designados por GC50 DPF.

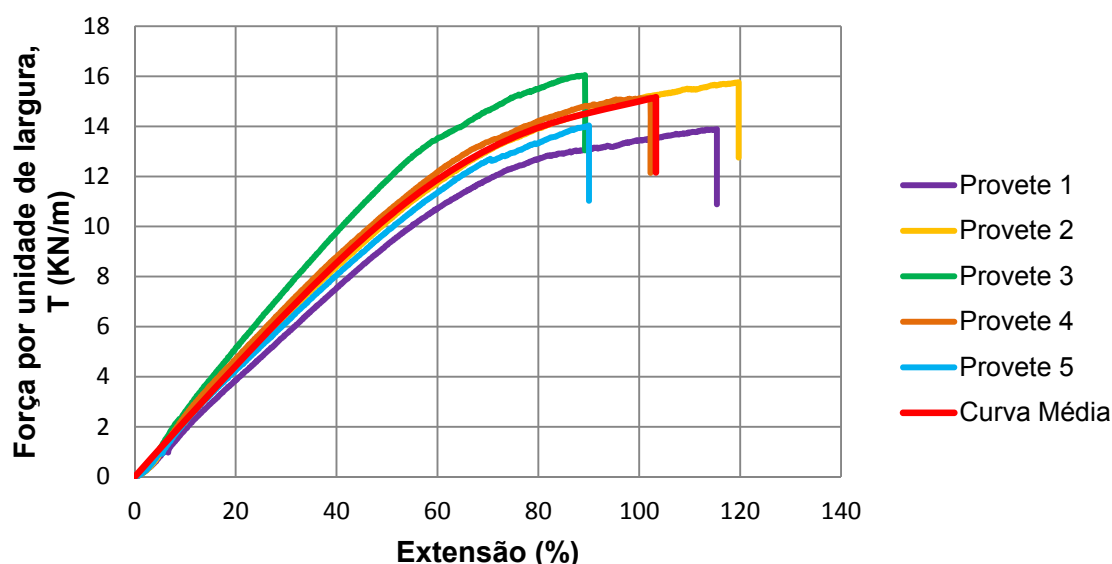



Fig. 4.4 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC50 DPF.

De seguida é apresentado o quadro resumo com os valores obtidos nos ensaios (Quadro 4.3) e o quadro de comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão (Quadro 4.4).

Quadro 4.3 – Valores obtidos no ensaio de tracção a provetes intactos para o geocompósito GC50 DPF.

GC 50 DPF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Provete 1	13,89	115,30	11,51	16,19	18,96	12,04	1044,26
Provete 2	15,75	119,70	10,79	18,29	21,99	13,16	1241,78
Provete 3	16,04	89,26	12,74	22,46	26,03	17,97	874,51
Provete 4	15,14	102,23	11,53	19,45	24,49	14,81	988,71
Provete 5	14,03	90,04	11,31	18,56	21,99	15,58	748,55
Média	14,97	103,31	11,58	18,99	22,69	14,71	979,56
Desvio Padrão	0,98	14,03	0,72	2,28	2,71	2,29	185,36
Coef. Variação (%)	6,56	13,58	6,19	12,00	11,93	15,54	18,92

Quadro 4.4 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50 DPF.

GC 50 DPF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	14,97	103,31	11,58	18,99	22,69	14,71	979,56
Curva Média Força - Extensão (VCM)	15,16	103,31	22,81	22,67	22,47	14,68	981,89
(VM - VCM) / VM (%)	1,27	0,00	97,06	19,36	0,99	0,26	0,24

Analisando os Quadros 4.3 e 4.4 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) - Os valores obtidos para cada um dos provetes foram bastante idênticos entre si, conforme se constata pelo baixo coeficiente de variação (6,56%). O valor da curva média é praticamente idêntico ao da média dos valores obtidos para cada provete, regista-se uma diferença de apenas 1,27% entre ambos.
- Extensão na carga máxima (**ε_{Fmax}**) – Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam alguma variação entre eles, conforme se constata pelo coeficiente de variação (13,58%). A extensão na carga máxima obtida apresenta valores elevados, sendo que a média dos mesmos ultrapassa 100%. Este valor permite concluir que este geocompósito, apresenta uma extensão na carga máxima superior ao seu comprimento inicial (valor superior a 100%). Esta extensão excessiva deve-se ao facto de no geocompósito, quando ensaiado nesta direcção, o principal elemento a conferir resistência ao mesmo é o geotêxtil não tecido em polipropileno, dado que os filamentos de reforço em poliéster se encontrarem numa direcção perpendicular à da carga aplicada. Acresce referir que é pressuposto que este tipo de geossintético nunca seja aplicado na direcção perpendicular ao fabrico quando esta direcção coincide com a direcção da maior solicitação.
- Rigidez secante (J_{sec}) – os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5% e 10% são crescentes entre eles, sendo que o da ε_{Fmax} é inferior ao de 10%. Os coeficientes de variação associados a cada uma das rigidezes são todos crescentes entre eles. Este facto reflecte que para as extensões até 10% (inclusive) o aumento de resistência à tracção foi superior aos incrementos de extensão. Refira-se que para a rigidez secante a 2% existe um grande desvio entre a média dos provetes ensaiados e o valor obtido a partir da curva média, variação de 97,06%, o que revela que para as extensões iniciais a aproximação da curva média à média dos resultados obtidos é pouco fiável, situação que se inverte para as rigidezes secante a extensões mais elevadas, conforme se constata pela variação de apenas 0,26% para a rigidez secante da ε_{Fmax} .
- Robustez – os valores obtidos para a robustez são elevados, acompanhando os valores obtidos para a extensão na carga máxima. Mediante os valores obtidos, o geocompósito, ensaiado nesta direcção, apresenta um comportamento flexível e robusto.

O coeficiente de variação (18,92%) revela alguma variabilidade entre os valores obtidos para cada provete ensaiado, sendo no entanto o valor obtido através da curva média praticamente idêntico à média dos provetes ensaiados, diferença de 0,24%.

4.3.7.2. Geocompósito GC50 – Direcção de Fabrico (DF)

Na Figura 4.5 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 5 provetes intactos do geocompósito GC50 na direcção de fabrico, abreviadamente designados por GC50 DF.

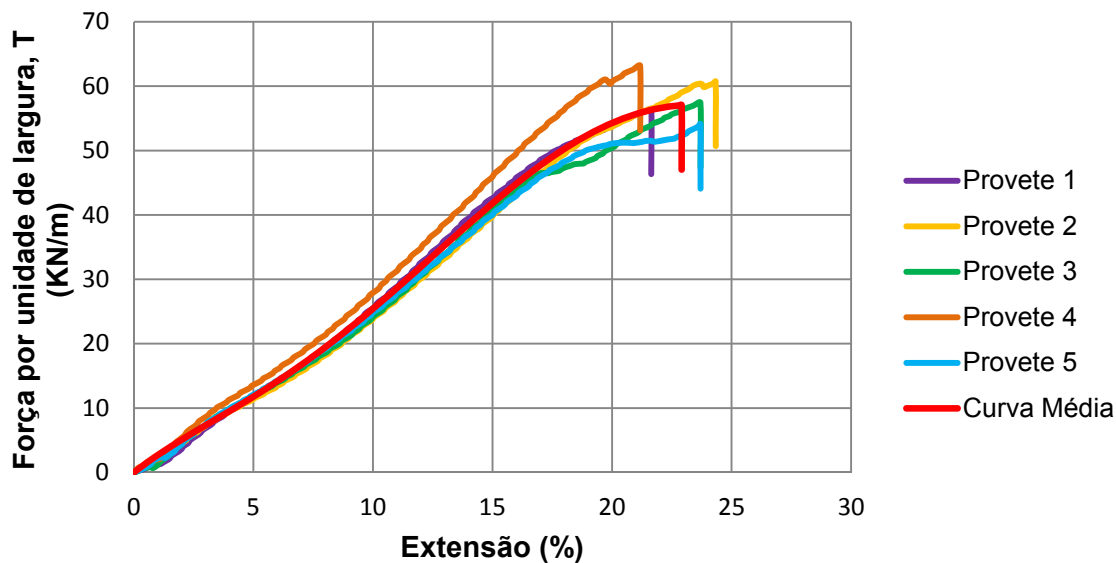



Fig. 4.5 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC50 DF.

De seguida é apresentado o quadro resumo com os valores obtidos nos ensaios (Quadro 4.5) e o quadro de comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão (Quadro 4.6).

Quadro 4.5 – Valores obtidos no ensaio de tracção a provetes intactos para o geocompósito GC50 DF.

GC 50 DF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Provete 1	56,35	21,64	183,83	236,89	255,40	260,41	625,50
Provete 2	60,70	24,33	225,78	228,27	238,75	249,44	760,32
Provete 3	57,39	23,70	218,88	238,04	242,14	234,51	710,51
Provete 4	63,13	21,18	269,34	271,69	278,98	298,06	665,24
Provete 5	54,09	23,70	217,93	241,57	248,72	228,24	706,48
Média	58,33	22,91	223,15	243,29	252,80	254,13	693,61
Desvio Padrão	3,58	1,40	30,55	16,61	15,97	27,60	50,86
Coef. Variação (%)	6,14	6,13	13,69	6,83	6,32	10,86	7,33

Quadro 4.6 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50 DF.

GC 50 DF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	58,33	22,91	223,15	243,29	252,80	254,13	693,61
Curva Média Força - Extensão (VCM)	57,13	22,91	254,22	235,50	254,19	249,36	696,03
(VM - VCM) / VM (%)	2,06	0,00	13,93	3,20	0,55	1,88	0,35

Analisando os Quadros 4.5 e 4.6 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) - Os valores obtidos para cada um dos provetes foram bastante idênticos entre si, conforme se constata pelo baixo coeficiente de variação (6,14%). O valor da curva média é praticamente idêntico ao da média dos valores obtidos para cada provete, regista-se uma diferença de apenas 2,06% entre ambos.

  Refira-se que Vieira (2008) para o mesmo geocompósito obteve como valor médio 55,30 kN/m, o qual é muito próximo do valor médio obtido neste ensaio;

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam pouca variação entre eles, conforme se constata pelo coeficiente de variação (6,13%).

  Refira-se que Vieira (2008) para o mesmo geocompósito obteve como valor médio 16,10%. A diferença de valores obtidos para este parâmetro pode ser justificada, pelo menos em parte, pelo tempo de armazenagem do material (cerca de 7 anos) e também pela influência, conhecida, nos resultados dos ensaios do executante dos mesmos.

- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5%, 10% e ε_{Fmax} são muito próximos entre eles, sendo que o coeficiente de variação da rigidez secante a 2% e ε_{Fmax} revela alguma dispersão de valores entre os resultados obtidos, situação contrária à verificada para a rigidez secante a 5% e 10%.

  No que se refere a aproximação da curva média à média dos provetes ensaiados conclui-se que com excepção da rigidez secante a 2% (variação de 13,93%), todas as restantes apresentam uma aproximação muito fiável (variação inferior a 4%).

  Refira-se que Vieira (2008) para o mesmo geocompósito obteve os seguintes valores médios ($J_{sec2\%}$ - 458kN/m; $J_{sec5\%}$ - 314kN/m; $J_{sec10\%}$ - 331kN/m; $J_{sec}\varepsilon_{Fmax}$ – 343kN/m) os quais revelam pequena variação entre eles, se excluirmos a rigidez secante a 2%.

  Comparando os valores obtidos neste ensaio com os de Vieira (2008) conclui-se que a diferença entre ambos é devida à diferença nas extensões máximas obtidas, ou seja para valores quase idênticos de resistência à tracção, existe uma diferença entre extensões máximas de 6,81% (22,91% - 16,10%). Recorde-se que a rigidez secante é inversamente proporcional à extensão;

- Robustez – Os valores obtidos para a robustez permitem classificar este geocompósito, ensaiado nesta direcção, como rígido e frágil, devido à sua resistência à tracção ser obtida para uma baixa extensão.

  O coeficiente de variação (7,33%) revela pouca variabilidade entre os valores obtidos para cada provete ensaiado. A diferença entre o valor obtido através da curva média e a média dos provetes ensaiados é quase inexistente, diferença de 0,35%.

4.3.7.3. Geocompósito GC100 – Direcção Perpendicular à de Fabrico (DPF)

Na Figura 4.6 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 5 provetes intactos do geocompósito GC100 na direcção perpendicular à de fabrico, abreviadamente designados por GC100 DPF.

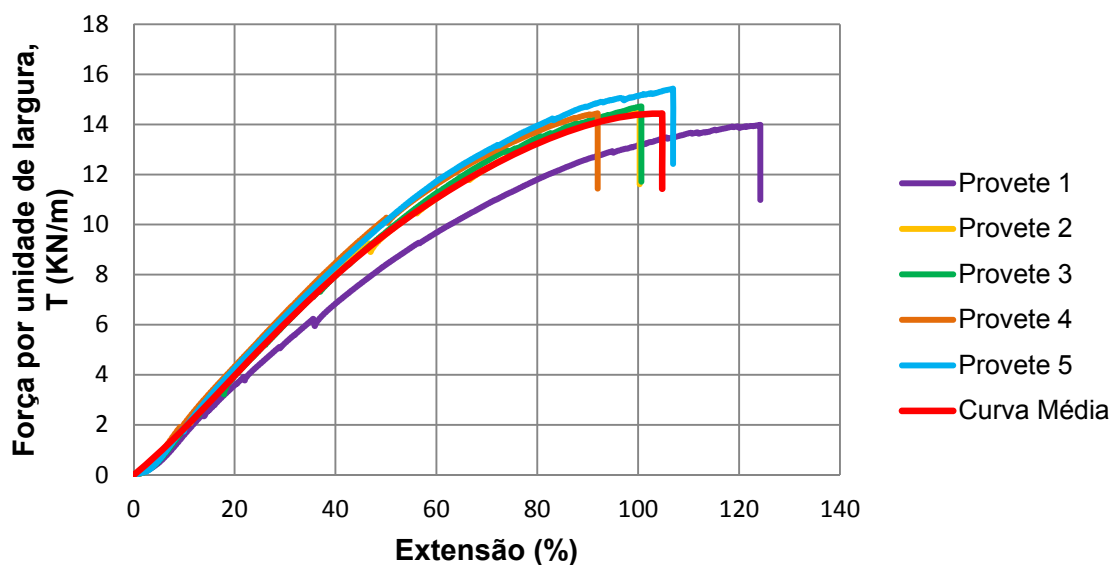



Fig. 4.6 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC100 DPF.

De seguida é apresentado o quadro resumo com os valores obtidos nos ensaios (Quadro 4.7) e o quadro de comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão (Quadro 4.8).

Quadro 4.7 – Valores obtidos no ensaio de tracção a provetes intactos para o geocompósito GC100 DPF.

GC 100 DPF	**T** (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Provete 1	13,98	124,22	5,83	9,75	15,93	11,26	1101,21
Provete 2	14,61	100,09	6,07	12,23	19,47	14,60	880,51
Provete 3	14,72	100,64	5,47	11,11	18,41	14,62	890,32
Provete 4	14,44	91,97	6,33	14,78	20,44	15,70	796,38
Provete 5	15,42	106,93	5,34	11,71	17,75	14,42	1023,58
Média	14,63	104,77	5,81	11,91	18,40	14,12	938,40
Desvio Padrão	0,52	12,10	0,41	1,85	1,72	1,68	122,06
Coef. Variação (%)	3,57	11,55	7,11	15,54	9,35	11,88	13,01

Quadro 4.8 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100 DPF.

GC 100 DPF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	14,63	104,77	5,81	11,91	18,40	14,12	938,40
Curva Média Força - Extensão (VCM)	14,43	104,77	16,66	17,48	18,55	13,77	941,41
(VM - VCM) / VM (%)	1,39	0,00	186,73	46,69	0,85	2,45	0,32

Analisando os Quadros 4.7 e 4.8 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) - Os valores obtidos para cada um dos provetes foram bastante idênticos entre si, conforme se constata pelo baixo coeficiente de variação (3,57%). O valor da curva média é praticamente idêntico ao da média dos valores obtidos para cada provete, regista-se uma diferença de apenas 1,39% entre ambos.
- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam alguma variação entre eles, conforme se verifica pelo coeficiente de variação (11,55%). A extensão na carga máxima apresenta valores elevados, sendo que a média dos mesmos ultrapassa 100%. Este valor permite concluir que este geocompósito, apresenta uma extensão na carga máxima superior ao seu comprimento inicial (valor superior a 100%). Esta extensão excessiva deve-se ao facto de no geocompósito, quando ensaiado nesta direcção, o principal elemento a conferir resistência ao mesmo é o geotêxtil polipropileno não tecido, dado os filamentos de reforço em poliéster (PET) se encontrarem numa direcção perpendicular à da carga aplicada. Tal como para o GC 50 ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico, acresce referir que é pressuposto que este tipo de geossintético nunca seja aplicado na direcção perpendicular ao fabrico quando esta direcção coincide com a direcção da maior solicitação.
- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5% e 10% são crescentes entre eles, sendo que o da ε_{Fmax} é inferior ao de 10%. Este facto reflecte que para as extensões até 10% (inclusive) o aumento de resistência à tracção foi superior aos incrementos de extensão. O coeficiente de variação em todas as rigidezes revela alguma variabilidade de resultados entre provetes.

  Refira-se que para a rigidez secante a 2% existe um grande desvio entre a média dos provetes ensaiados e o valor obtido a partir da curva média, variação de 186,73%, o que revela que para as extensões iniciais a aproximação da curva média à média dos resultados obtidos é pouco fiável, situação que se inverte para a rigidez secante a ε_{Fmax}, conforme se constata pela variação de apenas 2,45%.
- Robustez – Os valores obtidos para a robustez são elevados, acompanhando os valores obtidos para a extensão na carga máxima. Mediante os valores obtidos, o geocompósito, ensaiado nesta direcção, apresenta um comportamento flexível e robusto.

O coeficiente de variação (13,01%) revela alguma variabilidade entre os valores obtidos para cada provete ensaiado, sendo no entanto o valor obtido através da curva média praticamente idêntico à média dos provetes ensaiados, diferença de 0,32%.

4.3.7.4. Geocompósito GC100 – Direcção de Fabrico (DF)

No gráfico força-extensão da Figura 4.7 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 5 provetes intactos do geocompósito GC100 na direcção de fabrico, abreviadamente designados por GC100 DF.

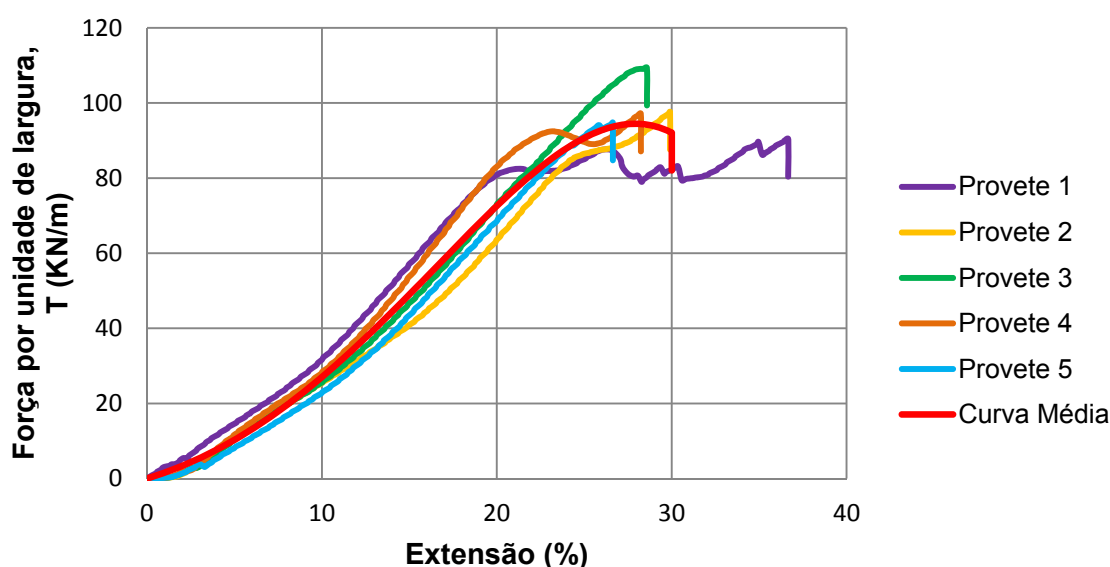



Fig. 4.7 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC100 DF.

De seguida é apresentado o quadro resumo com os valores obtidos nos ensaios (Quadro 4.9) e o quadro de comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão (Quadro 4.10).

Quadro 4.9 – Valores obtidos no ensaio de tracção a provetes intactos para o geocompósito GC100 DF.

GC 100 DF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Provete 1	90,38	36,66	259,82	291,92	316,51	246,52	2025,95
Provete 2	97,60	29,91	57,70	212,86	253,78	326,36	1355,39
Provete 3	109,34	28,59	71,37	205,61	255,71	382,50	1383,76
Provete 4	97,12	28,24	87,17	233,37	282,56	343,96	1408,16
Provete 5	94,75	26,63	67,59	163,36	228,55	355,74	1089,05
Média	97,84	30,01	108,73	221,42	267,42	331,01	1452,46
Desvio Padrão	7,04	3,90	85,12	46,92	33,44	51,46	345,35
Coef. Variação (%)	7,19	13,00	78,29	21,19	12,51	15,55	23,78

Quadro 4.10 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100 DF.

GC 100 DF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	97,84	30,01	108,73	221,42	267,42	331,01	1452,46
Curva Média Força - Extensão (VCM)	92,07	30,01	167,57	205,84	270,08	306,79	1486,75
(VM - VCM) / VM (%)	5,90	0,02	54,12	7,04	0,99	7,32	2,36

Da análise dos Quadros 4.9 e 4.10 verifica-se que:

- Resistência à tracção (T) - Os valores obtidos para cada um dos provetes foram relativamente idênticos entre si, sendo o coeficiente de variação 7,19%. O valor da curva média é uma boa aproximação ao da média dos valores obtidos para cada provete, regista-se uma diferença de 5,90% entre ambos.

  Refira-se que Vieira (2008) para o mesmo geocompósito obteve como valor médio 111,40 kN/m. Tal como para o GC 50 ensaiado na direcção de fabrico a diferença de valores obtidos para este parâmetro pode ser justificada, pelo menos em parte, pelo tempo de armazenagem do material (cerca de 7 anos) e também pela influência, conhecida, nos resultados dos ensaios do executante dos mesmos.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam variação entre eles, conforme se constata pelo coeficiente de variação (13%). O valor médio da extensão para a carga máxima obtido foi de 30,01%, bastante diferente do constante na ficha técnica do produtor (entre 10 e 16%). Esta diferença poderá ser explicada pelo facto da medição da extensão ser feita através do afastamento das pegas e não com recurso ao vídeo

extensómetro (método mais exacto), pela ocorrência de escorregamento entre o geotêxtil e as pegas, ou pelo tempo de armazenagem do geocompósito ensaiado (cerca de 7 anos) que poderá ter levado à alteração das propriedades do geossintético.

Refira-se que Vieira (2008) para o mesmo geocompósito obteve como valor médio 22,60% para a extensão na carga máxima. No seu trabalho de investigação Vieira (2008) efectuou mais ensaios de tracção, um deles a um só fio de poliéster retirado do geocompósito e o outro a provetes com 40mm de largura, tendo constado que, no ensaio a um filamento de poliéster, o valor médio da extensão na carga máxima era de 14,9% (isto é, dentro dos limites indicados na ficha técnica do produtor) e que, no ensaio com provetes com 40 mm de largura, o valor médio da extensão na carga máxima era de 17,7%.

Com base nos estudos de Vieira (2008) constata-se que quanto maior for a largura da amostra maiores são as extensões registadas para mesma força de tracção. Este comportamento resulta da maior contribuição para a extensão do geotêxtil não tecido de polipropileno constituinte do geocompósito.

- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5%, 10% e ε_{Fmax} são crescentes e com intervalos distintos entre eles. O coeficiente de variação da rigidez secante a 2% revela grande dispersão de valores (78,29%). Esta dispersão de valores é atenuada nas outras rigidezes no entanto os valores registados mantêm-se elevados.

  No que se refere a aproximação da curva média à média dos provetes ensaiados conclui-se que, com excepção da rigidez secante a 2% (variação de 54,12%), todas as restantes apresentam uma aproximação aceitável (variação máxima inferior a 8%).

  Vieira (2008) para o mesmo geocompósito obteve como valor médio para a rigidez secante na extensão máxima ($J_{sec}\varepsilon_{Fmax}$) de 493kN/m o qual se afasta do valor médio obtido neste ensaio (331,01 kN/m). A diferença entre ambos deve-se à diferença na extensão e resistência à tracção obtidas. Vieira (2008) obteve uma resistência média à tracção superior a registada no ensaio realizado neste trabalho e uma extensão média na carga máxima inferior à obtida no presente trabalho. Sendo a rigidez secante o quociente entre estas duas grandezas explica-se os valores superiores obtidos por Vieira (2008) para o valor médio da rigidez secante na extensão máxima.

- Robustez – Os valores obtidos para a robustez permitem classificar este geocompósito, ensaiado na direcção de fabrico, como rígido e robusto.

  O coeficiente de variação (23,78%) revela grande variabilidade entre os valores obtidos para cada provete ensaiado. A diferença entre o valor obtido através da curva média e a média dos provetes ensaiados é quase inexistente, diferença de 2,36%.

4.4. ENSAIO DE ABRASÃO

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos no ensaio de abrasão, seguindo a norma NP EN ISO 13427:2006.

A referida norma prevê o ensaio de tracção dos provetes submetidos a abrasão. Desta forma é possível comparar os valores da resistência à tracção obtidos para os provetes submetidos à abrasão com os dos provetes intactos.

De acordo com a norma NP EN ISO 13427:2006 os ensaios de tracção dos provetes devem ser realizados de acordo com as especificações da norma prEN ISO 13934-1 (Determinação da força máxima e alongamento à força máxima pelo método da tira para geotêxteis), no entanto no caso em estudo o ensaio de tracção dos provetes submetidos à tracção foi realizado segundo a norma NP EN ISO 10319:2005, anteriormente descrita.

Desta forma é possível estabelecer comparações entre os valores obtidos para a resistência à tracção com base na mesma norma de ensaio de tracção, o que permite evidenciar de forma mais acentuada o efeito da abrasão nos provetes ensaiados.

Segundo a norma NP EN ISO 13427:2006 os resultados obtidos no ensaio de abrasão deverão incluir a perda da resistência à tracção (em %), dada pela Equação 4.12.

$$\text{Perda de resistência à tracção} = \frac{T_{referência} - T_{abrasão}}{T_{referência}} \times 100 \qquad (4.12)$$

na qual:

- $T_{referência}$ é a resistência de tracção (em kN/m) obtida para provetes intactos;
- $T_{abrasão}$ é a resistência de tracção (em kN/m) obtida para provetes submetidos à abrasão.

Segundo a mesma norma uma amostra terá de ser constituída por um mínimo de 5 provetes e deverá ser feita uma análise estatística dos resultados obtidos a qual é composta pelo cálculo da média, desvio padrão e coeficiente de variação da amostra ensaiada.

4.4.1. Apresentação de Resultados

Analogamente ao ensaio de tracção, a apresentação dos resultados dos ensaios de abrasão dos geocompósitos ensaiados, será dividida por tipo de geocompósito e de direcção de ensaio.

É de notar que atendendo a que os geocompósitos apresentam faces distintas (face com filamentos de poliéster (PET) e face lisa) os ensaios de abrasão foram realizados para as duas faces de cada geocompósito, ou seja, ensaio no qual o abrasivo estava em contacto com a face de filamentos de PET (5 provetes por ensaio) e o ensaio no qual o abrasivo estava em contacto com a face lisa (2 provetes por ensaio).

Todos os resultados serão apresentados sob a forma de um gráfico força-extensão, sendo complementados por um quadro no qual estão indicadas as seguintes grandezas para cada um dos provetes ensaiados: resistência à tracção, extensão na força máxima, robustez e rigidez secante para 2%, 5%, 10% e ε_{Fmax} , incluindo os valores médios, os desvios padrão e os coeficientes de variação de cada um dos parâmetros.

É também apresentado um quadro no qual é feita a comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão.

Por último, apresenta-se um quadro no qual são comparados os valores obtidos no ensaio de tracção-extensão para provetes intactos e para os provetes submetidos à abrasão. Neste quadro apresenta-se a perda de resistência à tracção dos provetes submetidos à abrasão, bem como a correspondente análise estatística.

4.4.1.1. Geocompósito GC50 – Face Filamentos de PET - Direcção Perpendicular à de Fabrico (DPF)

No gráfico da Figura 4.8 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 5 provetes do geocompósito GC50 cuja face dos filamentos de PET foi submetida à abrasão. O geocompósito foi ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico,

A nomenclatura utilizada para designar o ensaio deste geocompósito foi GC50A PET DPF.

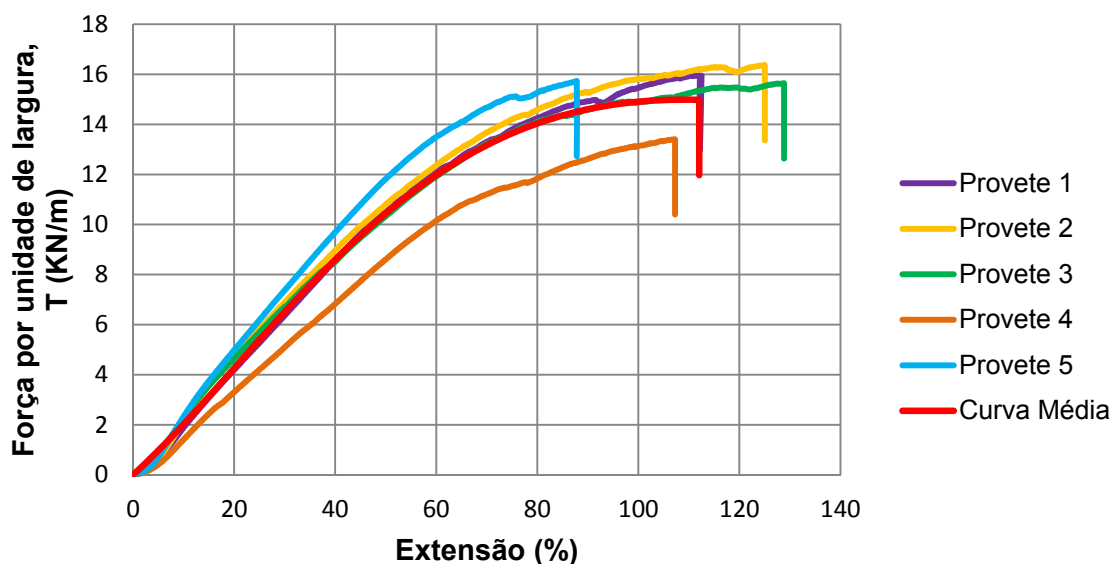



Fig. 4.8 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC50A PET DPF.

No Quadro 4.11 são apresentados os valores dos parâmetros obtidos no ensaio e no Quadro 4.12 compara-se os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão.

Quadro 4.11 – Valores obtidos no ensaio de tracção a provetes submetidos à abrasão para o geocompósito GC50A PET DPF.

GC50A PET DPF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Provete 1	15,95	111,62	5,54	11,75	18,96	14,29	1120,12
Provete 2	16,36	125,02	5,05	11,73	21,59	13,09	1376,46
Provete 3	15,64	128,65	6,39	15,27	22,86	12,15	1376,38
Provete 4	13,40	107,17	4,57	8,31	14,03	12,50	871,90
Provete 5	15,73	87,83	6,23	14,18	23,18	17,91	840,37
Média	15,42	112,06	5,56	12,25	20,12	13,99	1117,05
Desvio Padrão	1,16	16,24	0,77	2,69	3,79	2,34	260,39
Coef. Variação (%)	7,52	14,49	13,92	21,93	18,83	16,70	23,31

Quadro 4.12 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes submetidos à abrasão e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50A PET DPF.

GC 50A PET DPF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	15,42	112,06	5,56	12,25	20,12	13,99	1117,05
Curva Média Força - Extensão (VCM)	14,98	112,06	18,72	19,35	20,21	13,37	1112,33
(VM - VCM) / VM (%)	2,85	0,00	236,89	57,97	0,41	4,45	0,42

No Quadro 4.13 são comparados os valores obtidos no ensaio de tracção para os provetes intactos e para os provetes submetidos à abrasão, tendo sido calculada a perda de resistência à tracção para cada um deles.

Quadro 4.13 – Perda de resistência à tracção obtida para cada um dos provetes ensaiados, de geocompósito GC50A PET DPF.

GC50A PET DPF	Intacto T (kN/m)	Abrasão T (kN/m)	Perda de Resistência à Tracção (%)
Provete 1	13,89	15,95	-14,86
Provete 2	15,75	16,36	-3,86
Provete 3	16,04	15,64	2,52
Provete 4	15,14	13,40	11,50
Provete 5	14,03	15,73	-12,11
Média	14,97	15,42	-3,36
Desvio Padrão	0,98	1,16	10,78
Coef. Variação (%)	6,56	7,52	-320,33

Por último, no Quadro 4.14 é feita a comparação dos valores da perda de resistência à tracção, entre os valores obtidos a partir da média dos provetes ensaiados e os valores obtidos através da curva média força-extensão.

Quadro 4.14 – Comparação entre os valores obtidos, para a perda de resistência à tracção a partir da média dos resultados de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50A PET DPF.

GC50A PET DPF	Intacto T (kN/m)	Abrasão T (kN/m)	Perda de Resistência à Tracção (%)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	14,97	15,42	-2,97
Curva Média Força - Extensão (VCM)	15,16	14,98	1,21
(VM - VCM) / VM (%)	1,27	2,85	140,73

Analisando os Quadros 4.11 a 4.14 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) - Os valores obtidos para cada um dos provetes foram bastante idênticos entre si (coeficiente de variação de 7,52%). O valor da curva média é praticamente idêntico ao da média dos valores obtidos para cada provete, regista-se uma diferença de apenas 2,85% entre ambos.

  Relativamente à perda de resistência à tracção, analisando a média dos provetes ensaiados, verifica-se que este geocompósito quando ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico aumenta ligeiramente a sua resistência à tracção comparativamente aos valores da média dos provetes intactos. Este facto é constatado pelo valor de perda de resistência à tracção ser inferior a 0, neste caso -2,97%.

Refira-se que apesar da diferença entre a curva média e a média dos provetes ensaiados ser pequena (1,27% para os provetes intactos e 2,85% para os provetes submetidos à abrasão) a perda de resistência à tracção, pela análise da curva média, apresenta um valor superior a 0 (1,21%) o que traduz numa ligeira diminuição da resistência à tracção, comparativamente aos valores da curva média dos provetes intactos. A análise dos valores obtidos pela curva média contradiz a dos valores obtidos pela média dos provetes.

Apesar da contradição de valores na perda de resistência à tracção, fica demonstrado que a abrasão neste geocompósito, quando ensaiado nesta direcção, praticamente não afecta a sua resistência à tracção.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam alguma variação entre eles, conforme se constata pelo coeficiente de variação (14,49%).
- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5% e 10% são crescentes entre eles, sendo que o da ε_{Fmax} é inferior ao de 10%. Refira-se que para a rigidez secante a 2% existe um grande desvio entre a média dos provetes ensaiados e o valor obtido a partir da curva média, variação de 236,89%, o que revela que para as extensões iniciais a aproximação da curva média à média dos resultados obtidos é pouco fiável.
- Robustez – À semelhança do obtido para os provetes intactos, os valores obtidos para a robustez do material sujeito à abrasão são elevados, acompanhando os valores obtidos para a extensão na carga máxima. Mediante os valores registados, o geocompósito ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico apresenta um comportamento flexível e robusto.

  O coeficiente de variação (23,1%) revela variabilidade entre os valores obtidos para cada provete ensaiado, sendo no entanto o valor obtido através da curva média praticamente idêntico à média dos provetes ensaiados, diferença de 0,42%.

4.4.1.2. Geocompósito GC50 – Face Filamentos de PET - Direcção de Fabrico (DF)

No gráfico força-extensão da Figura 4.9 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 5 provetes do geocompósito GC50 cuja face com os filamentos de PET foi submetida à abrasão. O geocompósito foi ensaiado na direcção de fabrico.

A nomenclatura utilizada para designar o ensaio deste geocompósito foi GC50A PET DF.

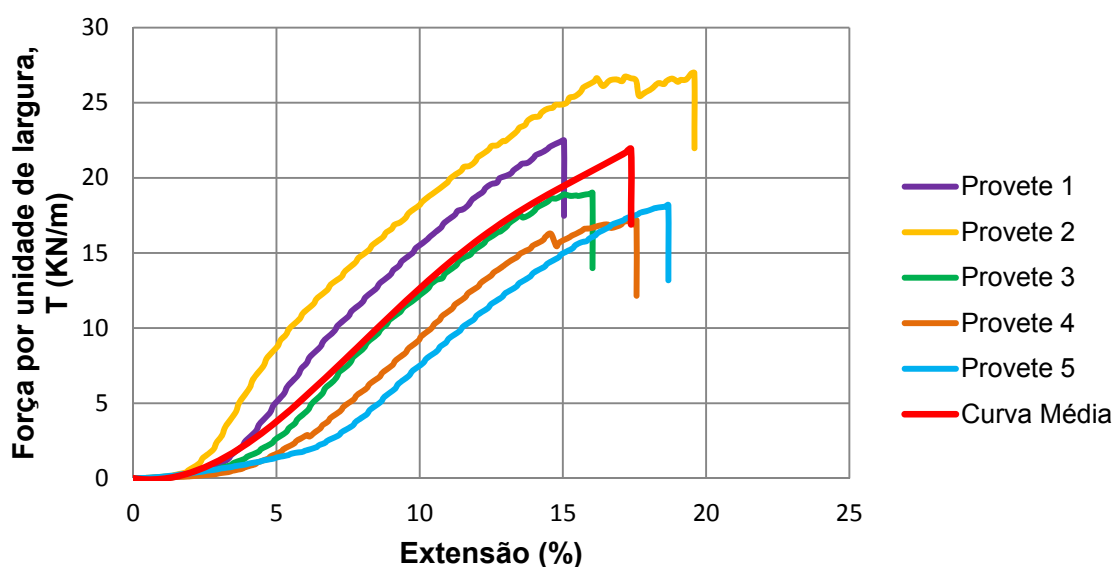



Fig. 4.9 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC50A PET DF.

De seguida é apresentado o quadro resumo com os valores obtidos nos ensaios (Quadro 4.15) e o quadro de comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão (Quadro 4.16).

Quadro 4.15 – Valores obtidos no ensaio de tracção a provetes submetidos à abrasão para o geocompósito GC50A PET DF.

GC50A PET DF	T	ε_{Fmax}	J_{sec} 2%	J_{sec} 5%	J_{sec} 10%	J_{sec} ε_{Fmax}	Robustez
	(kN/m)	(%)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m)
Provete 1	22,48	15,04	12,53	101,45	155,14	149,45	156,73
Provete 2	26,97	19,59	31,06	174,24	181,97	137,65	312,25
Provete 3	18,99	16,03	10,49	52,84	121,81	118,04	139,92
Provete 4	17,15	17,57	6,55	32,64	92,88	97,61	136,85
Provete 5	18,18	18,68	16,66	27,58	75,00	97,30	140,52
Média	20,75	17,38	15,46	77,75	125,36	120,01	177,25
Desvio Padrão	4,01	1,87	9,45	61,33	43,86	23,45	75,86
Coef. Variação (%)	19,32	10,73	61,14	78,88	34,99	19,54	42,80

Quadro 4.16 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes submetidos à abrasão e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50A PET DF.

GC 50A PET DF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	20,75	17,38	15,46	77,75	125,36	120,01	177,25
Curva Média Força - Extensão (VCM)	21,90	17,38	18,64	75,56	126,42	125,99	177,22
(VM - VCM) / VM (%)	5,51	0,02	20,59	2,81	0,85	4,98	0,02

No Quadro 4.17 são comparados os valores obtidos no ensaio de tracção-extensão para provetes intactos e para os provetes submetidos à abrasão, tendo sido calculada a perda de resistência à tracção para cada um deles.

Quadro 4.17 – Perda de resistência à tracção obtida para cada um dos provetes ensaiados, de geocompósito GC50A PET DF.

GC50A PET DF	**Intacto T** (kN/m)	**Abrasão T** (kN/m)	**Perda de Resistência à Tracção** (%)
Provete 1	56,35	22,48	60,11
Provete 2	60,70	26,97	55,57
Provete 3	57,39	18,99	66,91
Provete 4	63,13	17,15	72,83
Provete 5	54,09	18,18	66,39
Média	58,33	20,75	64,36
Desvio Padrão	3,58	4,01	6,66
Coef. Variação (%)	6,14	19,32	10,35

Por último, é apresentado um quadro no qual é feita a comparação dos valores da perda de resistência à tracção, entre os valores obtidos a partir da média dos provetes ensaiados e os valores obtidos através da curva média força-extensão (Quadro 4.18).

Quadro 4.18 – Comparação entre os valores obtidos, para a perda de resistência à tracção a partir da média dos resultados de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50A PET DF.

GC50A PET DF	Intacto T (kN/m)	Abrasão T (kN/m)	Perda de Resistência à Tracção (%)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	58,33	20,75	64,42
Curva Média Força - Extensão (VCM)	57,13	21,90	61,67
(VM - VCM) / VM (%)	2,06	5,51	4,27

Com base na informação constante nos Quadros 4.15 a 4.18 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) - Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam bastante variabilidade entre si, conforme se constata pelo coeficiente de variação (19,32%). O valor da curva média é uma boa aproximação ao da média dos valores obtidos para cada provete (diferença de 5,51%).

  Relativamente à perda de resistência à tracção, analisando a média dos provetes ensaiados, verifica-se que este geocompósito quando ensaiado na direcção de fabrico diminuiu significativamente a sua resistência à tracção comparativamente aos valores da média dos provetes intactos. Neste caso a perda de resistência à tracção foi de 64,42%.

  Refira-se que a perda de resistência à tracção pela análise da curva média (61,67%) é praticamente idêntica à obtida pela média dos provetes.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam alguma variação entre eles (coeficiente de variação 10,73%). A extensão na carga máxima obtida apresenta valores inferiores à verificada para os provetes intactos.

- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5%, 10% são crescentes entre eles sendo que o da ε_{Fmax} é muito próximo da de 10%. Este facto revela que o aumento da resistência à tracção foi superior aos incrementos de extensão. O coeficiente de variação indicia grande dispersão entre os valores obtidos para todas as extensões, sendo o valor máximo registado para a extensão de 2%.

  No que se refere a aproximação da curva média à média dos provetes ensaiados conclui-se que com excepção da rigidez secante a 2% (variação de 20,59%), todas as restantes rigidezes apresentam uma aproximação muito fiável (variação inferior a 5%).

  Relativamente à rigidez secante obtida, comparando os valores obtidos para os provetes submetidos à abrasão e os obtidos para provetes intactos conclui-se que os primeiros são muito mais baixos que os segundos.

- Robustez – Os valores obtidos para a robustez permitem classificar este geocompósito, ensaiado na direcção de fabrico, como flexível e frágil, devido à resistência máxima ser obtida para uma baixa extensão.

O coeficiente de variação (42,80%) revela grande variabilidade entre os valores obtidos para cada provete ensaiado. A diferença entre o valor obtido através da curva média e a média dos provetes ensaiados é praticamente inexistente, diferença de 0,02%.

4.4.1.3. Geocompósito GC100 – Face Filamentos de PET - Direcção Perpendicular à de Fabrico (DPF)

No gráfico força-extensão da Figura 4.10 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 5 provetes do geocompósito GC100 cuja face dos filamentos de PET foi submetida à abrasão. O geocompósito foi ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico.

A nomenclatura utilizada para designar o ensaio deste geocompósito foi GC100A PET DPF.

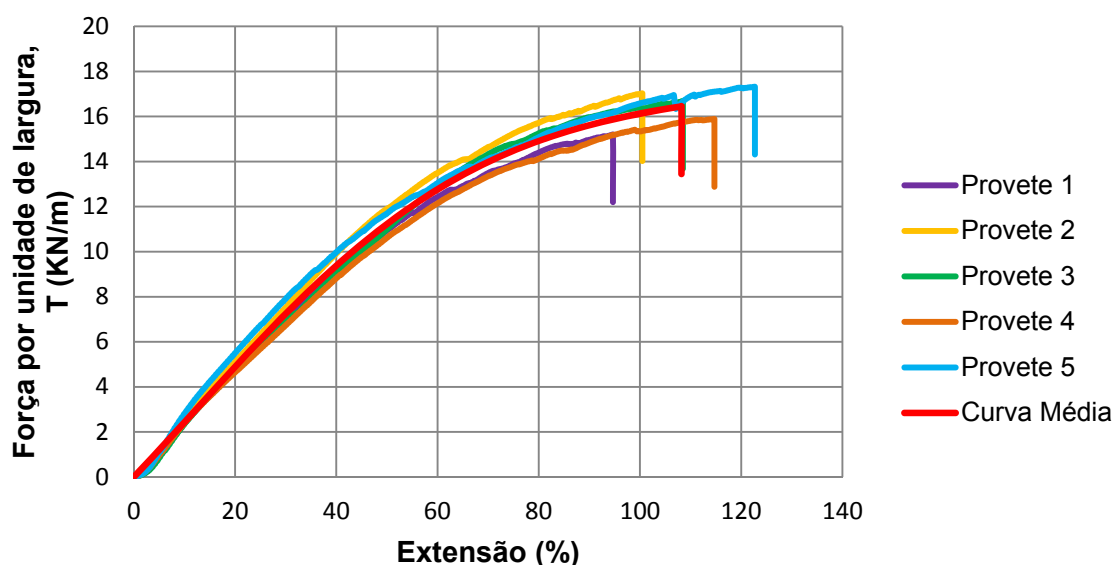



Fig. 4.10 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC100A PET DPF.

De seguida é apresentado o quadro resumo com os valores obtidos nos ensaios (Quadro 4.19) e o quadro de comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão (Quadro 4.20).

Quadro 4.19 – Valores obtidos no ensaio de tracção a provetes submetidos à abrasão para o geocompósito GC100A PET DPF.

GC100A PET DPF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Provete 1	15,20	94,67	7,81	18,06	23,76	16,06	887,81
Provete 2	17,02	100,47	8,52	19,01	25,50	16,94	1064,97
Provete 3	16,68	108,46	7,03	16,78	23,44	15,38	1145,32
Provete 4	15,88	114,70	9,09	19,39	23,99	13,84	1184,01
Provete 5	17,31	122,70	9,16	21,54	28,16	14,11	1427,21
Média	16,42	108,20	8,32	18,96	24,97	15,27	1141,86
Desvio Padrão	0,87	11,13	0,90	1,76	1,95	1,30	196,00
Coef. Variação (%)	5,28	10,29	10,85	9,29	7,81	8,54	17,17

Quadro 4.20 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes submetidos à abrasão e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100A PET DPF.

GC 100A PET DPF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	16,42	108,20	8,32	18,96	24,97	15,27	1141,86
Curva Média Força - Extensão (VCM)	16,45	108,20	23,65	23,94	24,27	15,20	1140,15
(VM - VCM) / VM (%)	0,18	0,00	184,20	26,27	2,81	0,41	0,15

No Quadro 4.21 são comparados os valores obtidos no ensaio de tracção para provetes intactos e para os provetes submetidos à abrasão, tendo sido calculada a perda de resistência à tracção para cada um deles.

Quadro 4.21 – Perda de resistência à tracção obtida para cada um dos provetes ensaiados, de geocompósito GC100A PET DPF.

GC100A PET DPF	Intacto T (kN/m)	Abrasão T (kN/m)	Perda de Resistência à Tracção (%)
Provete 1	13,98	15,20	-8,70
Provete 2	14,61	17,02	-16,49
Provete 3	14,72	16,68	-13,35
Provete 4	14,44	15,88	-10,01
Provete 5	15,42	17,31	-12,26
Média	14,63	16,42	-12,16
Desvio Padrão	0,52	0,87	3,03
Coef. Variação (%)	3,57	5,28	-24,93

Por último, é apresentado um quadro no qual é feita a comparação dos valores da perda de resistência à tracção, entre os valores obtidos a partir da média dos provetes ensaiados e os valores obtidos através da curva média força-extensão (Quadro 4.22).

Quadro 4.22 – Comparação entre os valores obtidos, para a perda de resistência à tracção a partir da média dos resultados de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100A PET DPF.

GC100A PET DPF	Intacto T (kN/m)	Abrasão T (kN/m)	Perda de Resistência à Tracção (%)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	14,63	16,42	-12,20
Curva Média Força - Extensão (VCM)	14,43	16,45	-13,99
(VM - VCM) / VM (%)	1,39	0,18	14,68

Analisando os Quadros 4.19 a 4.22 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) - Os valores obtidos para cada um dos provetes foram bastante idênticos entre si, conforme se constata pelo valor do coeficiente de variação (5,28%). O valor da curva média é praticamente idêntico ao da média dos valores obtidos para cada provete, regista-se uma diferença de apenas 0,18% entre ambos.

  Relativamente à perda de resistência à tracção, analisando a média dos provetes ensaiados, verifica-se que este geocompósito quando ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico, aumenta consideravelmente a sua resistência de tracção, comparativamente à obtida para provetes intactos. Este facto é constatado pela perda de resistência à tracção ser inferior a 0 (-12,20%)

Refira-se que a perda de resistência à tracção pela análise da curva média (-13.99%) é praticamente idêntica à obtida pela média dos provetes. (-12.20%)

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam alguma variação entre eles (coeficiente de variação de10,29%).
- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5% e 10% são crescentes entre eles, sendo que o da ε_{Fmax} é inferior ao da de 10%.

  Os valores crescentes revelam que o aumento da resistência à tracção foi superior aos incrementos de extensão.

  O coeficiente de variação indicia alguma dispersão de valores entre os resultados obtidos em todas as extensões, sendo o valor máximo registado, 10,85%, para a extensão de 2%.

  O desvio entre a média dos provetes ensaiados e o valor obtido a partir da curva média é elevado para a rigidez secante a 2%, variação de 184.20%, mostrando que para as extensões iniciais a aproximação da curva média à média dos resultados obtidos é pouco fiável.

  Para a rigidez secante a 10% assim como para a rigidez secante ε_{Fmax}, o desvio entre a curva média e a média dos provetes ensaiados é quase inexistente.

  Relativamente à rigidez secante obtida, comparando os valores obtidos para os provetes submetidos à abrasão e os obtidos para provetes intactos conclui-se que os valores são da mesma ordem de grandeza demonstrando também a mesma tendência de crescimento entre eles.
- Robustez – À semelhança do verificado para os provetes intactos, os valores obtidos para a robustez são elevados, acompanhando os valores registados para a extensão na carga máxima. Mediante os valores obtidos, o geocompósito, ensaiado nesta direcção, apresenta um comportamento flexível e robusto.

  O coeficiente de variação (17,17%) indica variabilidade entre os valores obtidos para cada provete ensaiado, sendo no entanto o valor obtido através da curva média praticamente idêntico à média dos provetes ensaiados, diferença de 0.15%.

4.4.1.4. Geocompósito GC100 – Face Filamentos de PET - Direcção de Fabrico (DF)

No gráfico força-extensão da Figura 4.11 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 5 provetes do geocompósito GC100 cuja face com filamentos de PET foi submetida à abrasão. O geocompósito foi ensaiado na direcção de fabrico.

A nomenclatura utilizada para designar o ensaio deste geocompósito foi GC100A PET DF.

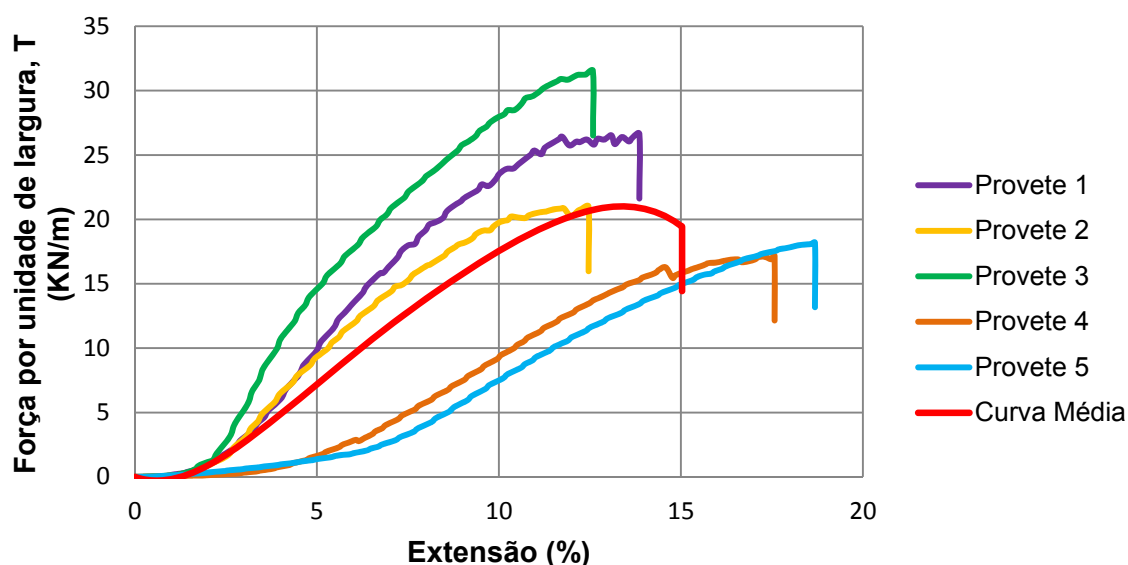



Fig. 4.11 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC100A PET DF.

No Quadro 4.23 faz-se o resumo dos valores obtidos nos ensaios e o Quadro 4.24 compara-se os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão.

Quadro 4.23 – Valores obtidos no ensaio de tracção a provetes submetidos à abrasão para o geocompósito GC100A PET DF.

GC100A PET DF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Provete 1	26,62	13,86	47,48	196,45	234,92	192,07	201,18
Provete 2	20,97	12,46	43,73	186,25	197,31	168,27	140,53
Provete 3	31,51	12,59	57,88	291,61	279,60	250,31	210,54
Provete 4	17,15	17,57	6,55	32,64	92,88	97,60	136,85
Provete 5	18,18	18,68	16,66	27,58	75,00	97,30	140,52
Média	22,89	15,03	34,46	146,91	175,94	161,11	165,92
Desvio Padrão	6,06	2,90	21,79	114,28	89,12	65,33	36,64
Coef. Variação (%)	26,49	19,32	63,24	77,79	50,65	40,55	22,08

Quadro 4.24 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes submetidos à abrasão e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100A PET DF.

GC 100A PET DF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	22,89	15,03	34,46	146,91	175,94	161,11	165,92
Curva Média Força - Extensão (VCM)	19,43	15,03	43,85	143,73	175,39	129,28	175,32
(VM - VCM) / VM (%)	15,11	0,02	27,25	2,16	0,31	19,76	5,66

No Quadro 4.25 são comparados os valores obtidos no ensaio de tracção para provetes intactos e para os provetes submetidos à abrasão, tendo sido calculada a perda de resistência à tracção para cada um deles.

Quadro 4.25 – Perda de resistência à tracção obtida para cada um dos provetes ensaiados, de geocompósito GC100A PET DF.

GC100A PET DF	Intacto T (kN/m)	Abrasão T (kN/m)	Perda de Resistência à Tracção (%)
Provete 1	90,38	26,62	70,54
Provete 2	97,60	20,97	78,51
Provete 3	109,34	31,51	71,18
Provete 4	97,12	17,15	82,34
Provete 5	94,75	18,18	80,81
Média	97,84	22,89	76,68
Desvio Padrão	7,04	6,06	5,49
Coef. Variação (%)	7,19	26,49	7,15

Por último, é apresentado o Quadro 4.26 no qual é feita a comparação dos valores da perda de resistência à tracção, entre os valores obtidos a partir da média dos provetes ensaiados e os valores obtidos através da curva média força-extensão.

Quadro 4.26 – Comparação entre os valores obtidos, para a perda de resistência à tracção a partir da média dos resultados de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100A PET DF.

GC100A PET DF	Intacto T (kN/m)	Abrasão T (kN/m)	Perda de Resistência à Tracção (%)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	97,84	22,89	76,61
Curva Média Força - Extensão (VCM)	92,07	19,43	78,90
(VM - VCM) / VM (%)	5,90	15,11	2,99

Analisando os Quadros 4.23 a 4.26 pode-se afirmar que:

- Resistência à tracção (T) - Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam bastante variabilidade entre si (coeficiente de variação 26,49%). O valor da curva média apresenta alguns desvios relativamente ao da média dos valores obtidos para cada provete, regista-se uma diferença de 15,11% entre ambos.

  Relativamente à perda de resistência à tracção, analisando a média dos provetes ensaiados, verifica-se que este geocompósito quando ensaiado na direcção de fabrico, diminuiu muito a sua resistência à tracção comparativamente aos valores da média dos provetes intactos. Neste caso a perda de resistência à tracção foi de 76,61%.

  Refira-se que a perda de resistência à tracção pela análise da curva média (78,90%) é praticamente idêntica à obtida pela média dos provetes.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam alguma variação entre eles, conforme se constata pelo coeficiente de variação (19,32%). A extensão na carga máxima obtida é praticamente metade da obtida para os provetes intactos.

- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5%, 10% são crescentes entre eles sendo que o da ε_{Fmax} é inferior a de 10%. Este facto revela que o aumento da resistência à tracção foi superior aos incrementos de extensão. O coeficiente de variação indicia grande dispersão de valores entre os resultados obtidos em todas as extensões, sendo o valor máximo registado para a extensão de 5%.

  No que se refere a aproximação da curva média à média dos provetes ensaiados conclui-se que para a rigidez secante a 2% e para a rigidez secante ε_{Fmax} existe uma variação assinalável, para as restantes rigidezes a aproximação é muito fiável.

  Relativamente à rigidez secante obtida, comparando os valores obtidos para os provetes submetidos à abrasão e os obtidos para provetes intactos conclui-se que os primeiros são muito mais baixos que os segundos.

- Robustez – Os valores registados para a robustez permitem classificar este geocompósito, ensaiado na direcção de fabrico, como rígido e frágil, uma vez que a sua resistência máxima foi obtida para uma baixa extensão.

O coeficiente de variação (22,08%) revela grande variabilidade entre os valores obtidos para cada provete ensaiado. A curva média apresenta uma boa aproximação à média dos provetes ensaiados sendo a diferença registada de 5,66%.

4.4.1.5. Geocompósito GC50 – Face sem Filamentos de PET - Direcção Perpendicular à de Fabrico (DPF)

No gráfico força-extensão da Figura 4.12, apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 2 provetes do geocompósito GC50 cuja face sem filamentos de PET foi submetida à abrasão. O geocompósito foi ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico.

Foram apenas ensaiados 2 provetes, já que o objectivo deste estudo foi o de comprovar se o valor da resistência à tracção é mais afectada quando a face com filamentos de poliéster (PET) é sujeita à abrasão

A nomenclatura utilizada para designar o ensaio deste geocompósito foi GC50A LISA DPF.

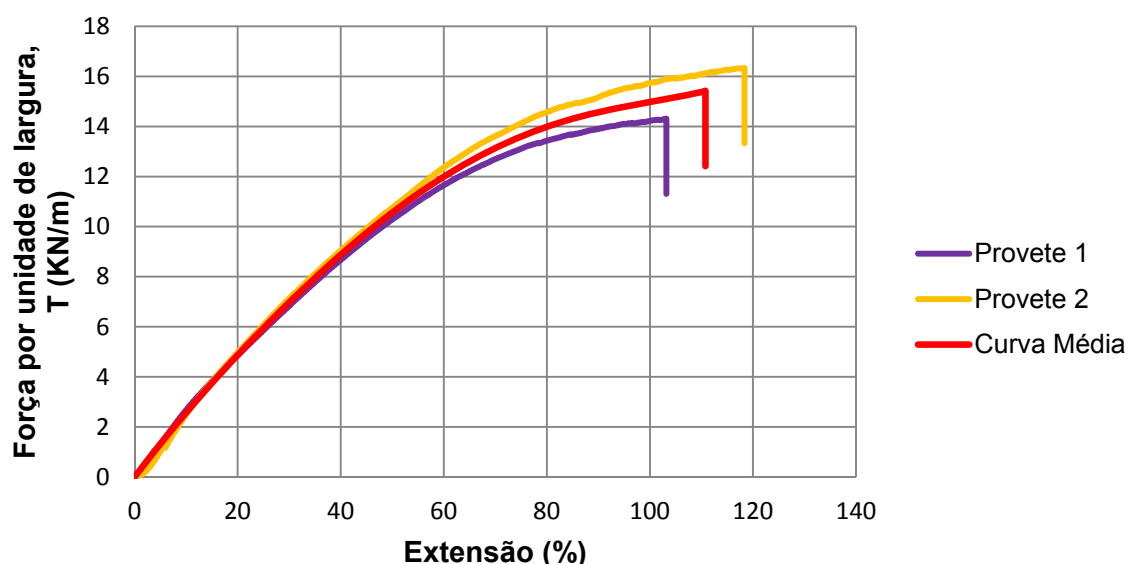



Fig. 4.12 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC50A LISA DPF.

No Quadro 4.27 compara-se os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais e os valores da curva média força-extensão.

Quadro 4.27 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes submetidos à abrasão e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50A LISA DPF.

GC 50A LISA DPF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	15,32	110,77	17,22	22,92	25,90	13,83	1121,62
Curva Média Força - Extensão (VCM)	15,42	110,77	27,03	26,50	25,71	13,92	1115,83
(VM - VCM) / VM (%)	0,63	0,00	56,99	15,60	0,74	0,65	0,52

Por último, é apresentado um quadro no qual é feita a comparação dos valores da perda de resistência à tracção, entre os valores obtidos a partir da média dos provetes ensaiados e os valores obtidos através da curva média força-extensão (Quadro 4.28).

Quadro 4.28 – Comparação entre os valores obtidos, para a perda de resistência à tracção a partir da média dos resultados de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50A LISA DPF.

GC50A LISA DPF	Intacto T (kN/m)	Abrasão T (kN/m)	Perda de Resistência à Tracção (%)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	14,97	15,32	-2,34
Curva Média Força - Extensão (VCM)	15,16	15,42	-1,72
(VM - VCM) / VM (%)	1,27	0,63	26,65

Com base na informação constante nos Quadros 4.27 e 4.28 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) – Os valores da curva média são praticamente idênticos ao da média dos valores obtidos para os provetes, regista-se uma diferença de 0,63% entre ambos.

  Relativamente à perda de resistência à tracção, analisando a média dos provetes ensaiados, verifica-se que este geocompósito, quando ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico, aumentou a sua resistência à tracção comparativamente aos valores da média dos provetes intactos. Este facto é constatado pela perda de resistência à tracção ser inferior a 0 (-2,34%)

  Refira-se que a perda de resistência à tracção pela análise da curva média (-1,72%) é praticamente idêntica à obtida pela média dos provetes.

  Conforme se constata pela análise da média dos provetes ensaiados, a perda de resistência à tracção obtida no ensaio de abrasão da face sem filamentos de PET do geocompósito (-2,34%), conduziu a resultados quase idênticos para os obtidos no ensaio da face de filamentos de PET. (-2,97%)

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) - A extensão na carga máxima obtida para o geocompósito cuja face sem filamentos de PET foi ensaiada à abrasão (110,77%) é quase idêntica à extensão na carga máxima obtida para o geocompósito no mesmo ensaio mas realizado sobre a face com filamentos de PET (112,06%).
- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5%, 10% são crescentes entre eles sendo que o da ε_{Fmax} é inferior a de 10%. Os valores crescentes da rigidez secante revelam que o aumento da resistência à tracção foi superior aos incrementos de extensão.

  No que se refere a aproximação da curva média à média dos provetes ensaiados conclui-se que para a rigidez secante a 2% e a 5% existe uma variação assinalável, para as restantes rigidezes a aproximação é muito fiável.

  Comparativamente à rigidez secante obtida no ensaio de abrasão da face com filamentos de PET, os valores obtidos no presente ensaio revelam a mesma tendência crescente com excepção da rigidez secante ε_{Fmax}, no entanto as rigidezes secantes obtidas são mais elevadas, ainda que bastante próximas, das do ensaio relativo à face com filamentos de PET.
- Robustez – Os valores obtidos para a robustez permitem classificar este geocompósito, ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico, como flexível e robusto, dado a sua resistência à tracção ser baixa e obtida para uma elevada extensão.

  A curva média apresenta valores muito idênticos à média dos provetes ensaiados sendo a diferença registada de 0,52%.

  Comparativamente à robustez média dos provetes ensaiados obtida no ensaio de abrasão da face com filamentos de PET (1117,05 kN/m), os valores obtidos neste ensaio são praticamente idênticos (1121,62 kN/m).

4.4.1.6. Geocompósito GC50 – Face sem Filamentos de PET - Direcção de Fabrico (DF)

No gráfico força-extensão da Figura 4.13 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 2 provetes do geocompósito GC50 cuja face sem filamentos de PET foi submetida à abrasão. O geocompósito foi ensaiado na direcção de fabrico.

Foram apenas ensaiados 2 provetes, já que o objectivo deste estudo foi o de comprovar se o valor da resistência à tracção é mais afectada quando a face com filamentos de poliéster (PET) é sujeita à abrasão.

A nomenclatura utilizada para designar o ensaio deste geocompósito foi GC50A LISA DF.

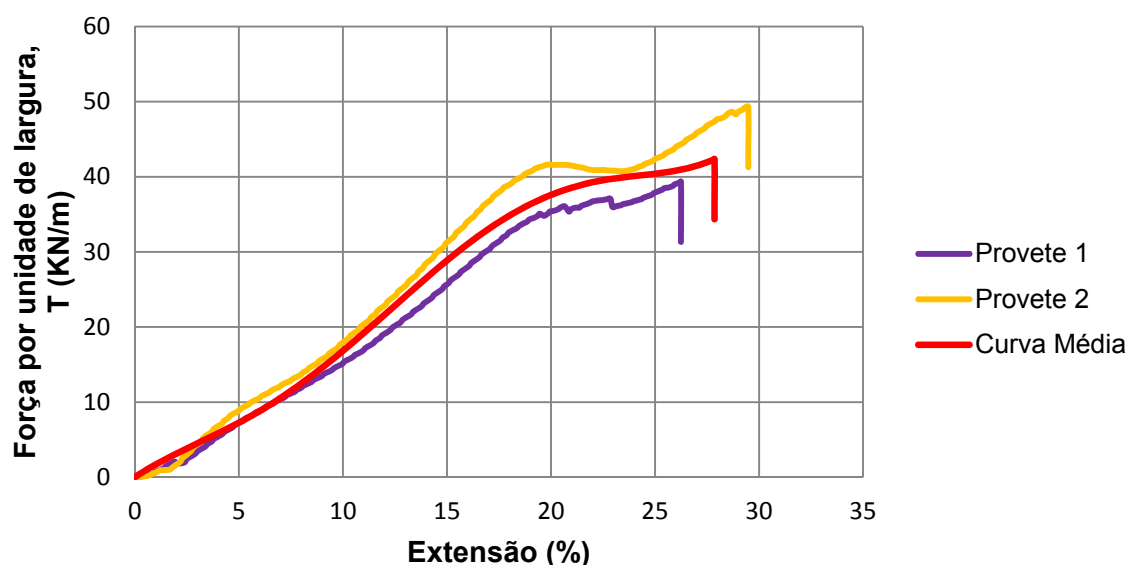



Fig. 4.13 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC50A LISA DF.

No Quadro 4.29 compara-se os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais e os valores da curva média força-extensão.

Quadro 4.29 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes submetidos à abrasão e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50A LISA DF.

GC 50A LISA DF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	44,31	27,86	90,49	161,21	165,59	158,49	681,48
Curva Média Força - Extensão (VCM)	42,35	27,86	157,86	145,19	168,26	152,00	674,58
(VM - VCM) / VM (%)	4,43	0,02	74,44	9,94	1,61	4,10	1,01

Por último, o Quadro 4.30 compara os valores da perda de resistência à tracção definidos a partir dos valores da média dos provetes ensaiados e os valores obtidos através da curva média força-extensão.

Quadro 4.30 – Comparação entre os valores obtidos, para a perda de resistência à tracção a partir da média dos resultados de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50A LISA DF.

GC50A LISA DF	**Intacto T** (kN/m)	**Abrasão T** (kN/m)	**Perda de Resistência à Tracção** (%)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	58,33	44,31	24,04
Curva Média Força - Extensão (VCM)	57,13	42,35	25,87
(VM - VCM) / VM (%)	2,06	4,43	7,64

Analisando os Quadros 4.29 e 4.30 verifica-se que:

- Resistência à tracção (T) – Os valores da curva média são praticamente idênticos ao da média dos valores obtidos para os provetes, regista-se uma diferença de 4,43% entre ambos.

  Relativamente à perda de resistência à tracção, analisando a média dos provetes ensaiados, verifica-se que este geocompósito quando ensaiado na direcção de fabrico diminuiu a sua resistência à tracção comparativamente aos valores da média dos provetes intactos. Neste caso a perda de resistência à tracção foi de 24,04%.

  Refira-se que a perda de resistência à tracção pela análise da curva média (25,87%) é praticamente idêntica à obtida pela média dos provetes.

  Conforme se constata pela análise da média dos provetes ensaiados, a perda de resistência à tracção obtida no ensaio de abrasão da face sem filamentos de PET do geocompósito (24,04%), conduziu a resultados muito abaixo dos obtidos no ensaio da face com filamentos de PET (64,42%).

  Este facto demonstra que para este geocompósito, ensaiado na direcção de fabrico, a abrasão na face com filamentos PET diminui a resistência à tracção de forma mais acentuada do que a abrasão na face sem este tipo de filamentos.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) - A extensão na carga máxima obtida para o geocompósito cuja face sem filamentos de PET foi ensaiada à abrasão (27,86%) é superior à extensão na carga máxima obtida para o geocompósito no mesmo ensaio mas realizado sobre a face com filamentos de PET (17,38%).

- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5%, 10% são crescentes entre eles, sendo que o da ε_{Fmax} é inferior à de 10%. %. Os valores crescentes revelam que o aumento da resistência à tracção foi superior aos incrementos de extensão.

  No que se refere a aproximação da curva média à média dos provetes ensaiados conclui-se que para a rigidez secante a 2% e a 5% existe uma variação assinalável, para as restantes rigidezes a aproximação é muito fiável.

  Comparativamente às rigidezes secantes obtidas no ensaio de abrasão da face com filamentos de PET, os valores obtidos no ensaio em análise revelam a mesma tendência crescente com a extensão com excepção da rigidez secante ε_{Fmax}, no entanto as rigidezes secantes obtidas neste

ensaio são mais elevadas do que as encontradas quando a face com filamentos de PET é sujeita à abrasão.

- Robustez – Os valores obtidos para a robustez permitem classificar este geocompósito, ensaiado na direcção de fabrico, como rígido e frágil, uma vez que a sua resistência à tracção é elevada e obtida para uma baixa extensão.

  A curva média apresenta valores muito idênticos à média dos provetes ensaiados sendo a diferença registada de 1,01%.

  Comparativamente à robustez média dos provetes ensaiados obtida no ensaio de abrasão da face com filamentos de PET (177,25 kN/m), os valores obtidos no ensaio em análise são mais elevados (681,48 kN/m).

4.4.1.7. Geocompósito GC100 – Face sem Filamentos de PET - Direcção Perpendicular à de Fabrico (DPF)

No gráfico força-extensão da Figura 4.14 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 2 provetes do geocompósito GC100 cuja face sem filamentos de PET foi submetida à abrasão. O geocompósito foi ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico.

Foram apenas ensaiados 2 provetes, já que o objectivo deste estudo foi o de comprovar se o valor da resistência à tracção é mais afectada quando a face com filamentos de poliéster (PET) é sujeita à abrasão.

A nomenclatura utilizada para designar o ensaio deste geocompósito foi GC100A LISA DPF.

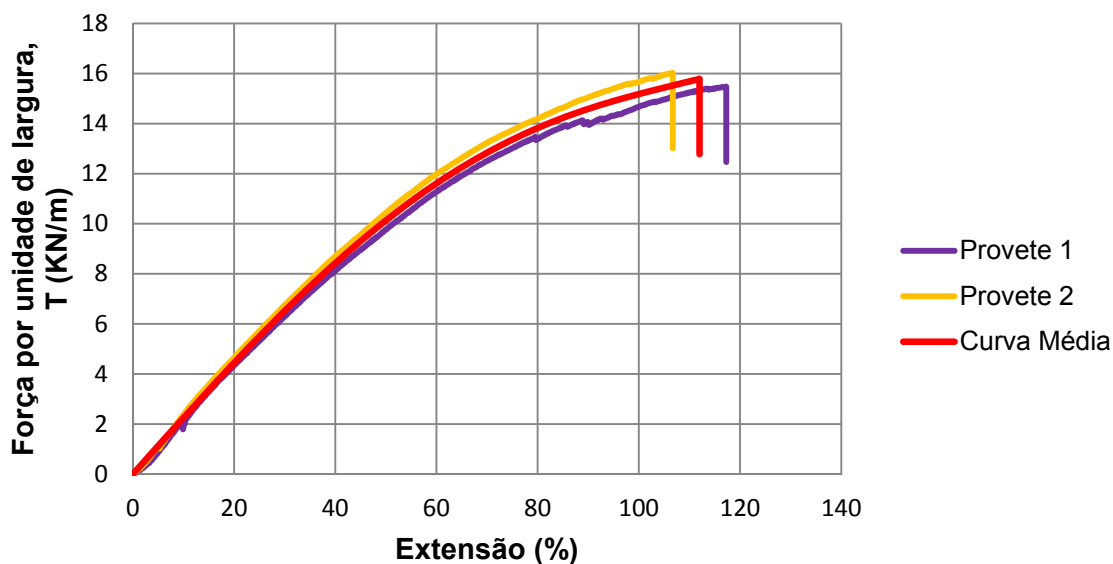



Fig. 4.14 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC100A LISA DPF.

No Quadro 4.31 compara-se os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais e os valores da curva média força-extensão.

Quadro 4.31 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes submetidos à abrasão e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100A LISA DPF.

GC 100A LISA DPF	T (kN/m)	ε_{Fmax} (%)	J_{sec} 2% (kN/m)	J_{sec} 5% (kN/m)	J_{sec} 10% (kN/m)	J_{sec} ε_{Fmax} (kN/m)	Robustez (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	15,74	111,99	14,91	19,21	21,33	14,10	1106,82
Curva Média Força - Extensão (VCM)	15,78	111,99	22,69	22,65	22,55	14,09	1109,41
(VM - VCM) / VM (%)	0,24	0,00	52,19	17,88	5,70	0,06	0,23

Por último, é apresentado um quadro no qual é feita a comparação dos valores da perda de resistência à tracção, entre os valores obtidos a partir da média dos provetes ensaiados e os valores obtidos através da curva média força-extensão (Quadro 4.32).

Quadro 4.32 – Comparação entre os valores obtidos, para a perda de resistência à tracção a partir da média dos resultados de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100A LISA DPF.

GC100A LISA DPF	Intacto T (kN/m)	Abrasão T (kN/m)	Perda de Resistência à Tracção (%)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	14,63	15,74	-7,60
Curva Média Força - Extensão (VCM)	14,43	15,78	-9,36
(VM - VCM) / VM (%)	1,37	0,24	23,11

Com base na informação constante nos Quadros 4.31 e 4.32 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) – Os valores da curva média são praticamente idênticos ao da média dos valores obtidos para os provetes, regista-se uma diferença de 0,24% entre ambos.

  Relativamente à perda de resistência à tracção, analisando a média dos provetes ensaiados, verifica-se que este geocompósito, quando ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico, aumentou a sua resistência à tracção comparativamente aos valores da média dos provetes intactos. Este facto é constatado pela perda de resistência à tracção ser inferior a 0 (-7,60%)

  Refira-se que a perda de resistência à tracção pela análise da curva média (-9,36%) é bastante similar à obtida pela média dos provetes.

  Conforme se verifica pela análise da média dos provetes ensaiados, a perda de resistência à tracção obtida no ensaio com abrasão da face sem filamentos de PET do geocompósito (-

7,60%), conduziu a resultados diferentes dos obtidos no ensaio com a face de filamentos de PET sujeita à abrasão. (-12,20%).

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) - A extensão na carga máxima obtida para o geocompósito cuja face sem filamentos de PET foi sujeita à abrasão (111,99%) é quase idêntica à extensão na carga máxima obtida para o geocompósito em que a face com filamentos de PET foi sujeita à abrasão (108,20%).
- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5%, 10% são crescentes com a extensão, sendo que o da ε_{Fmax} é inferior ao de 10%. Os valores crescentes com a extensão revelam que o aumento da resistência à tracção foi superior aos incrementos de extensão.

  No que se refere a aproximação da curva média à média dos provetes ensaiados conclui-se que para a rigidez secante a 2% e a 5% existe uma variação assinalável, para as restantes rigidezes a aproximação é muito fiável.

  Os valores das rigidezes secantes obtida no ensaio do geocompósito com a face com filamentos de PET sujeita à abrasão revelam a mesma tendência crescente com a extensão, com excepção da rigidez secante ε_{Fmax}.
- Robustez – Os valores obtidos para a robustez permitem classificar este geocompósito, ensaiado na direcção em consideração, como flexível e robusto, uma vez que a sua resistência à tracção é baixa e obtida para uma elevada extensão.

  A curva média apresenta valores muito idênticos à média dos provetes ensaiados sendo a diferença registada de 0,23%.

  A robustez média obtida no ensaio com a face com filamentos de PET foi de 1141,86 kN/m, enquanto que no caso em análise o valor do mesmo parâmetro é cerca de 1106,82 kN/m.

4.4.1.8. Geocompósito GC100 – Face sem Filamentos de PET - Direcção de Fabrico (DF)

A Figura 4.15 apresenta os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 2 provetes do geocompósito GC100 cuja face sem filamentos de PET foi submetida à abrasão. O geocompósito foi ensaiado na direcção de fabrico.

Foram apenas ensaiados 2 provetes, já que o objectivo deste estudo foi o de comprovar se o valor da resistência à tracção é mais afectada quando a face com filamentos de poliéster (PET) é sujeita à abrasão.

A nomenclatura utilizada para designar o ensaio deste geocompósito foi GC100A LISA DF.

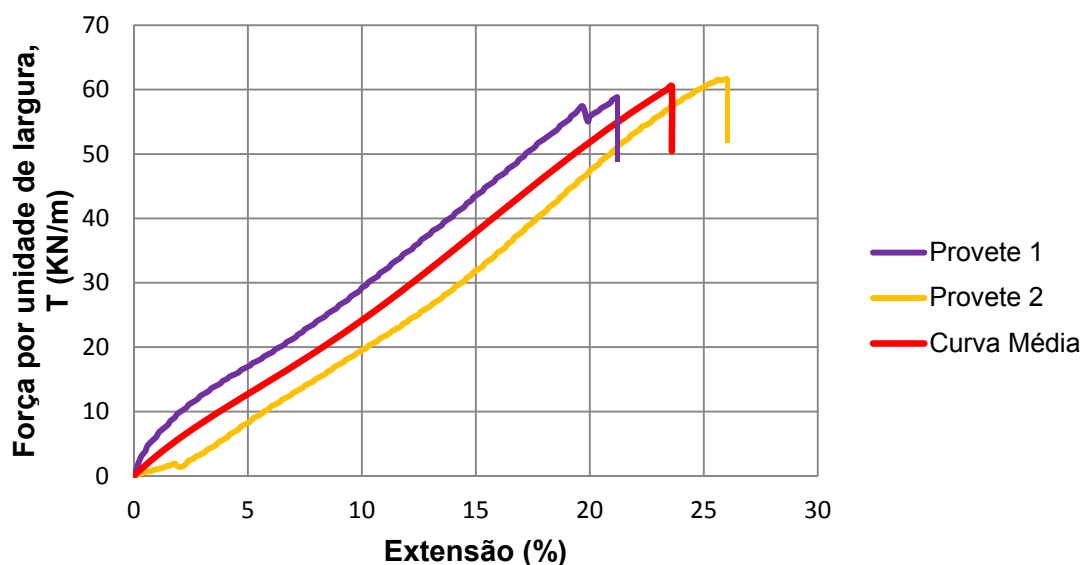



Fig. 4.15 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC100A LISA DF.

No Quadro 4.33 compara-se os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais e os valores da curva média força-extensão.

Quadro 4.33 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes submetidos à abrasão e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100A LISA DF.

GC 100A LISA DF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	60,25	23,60	283,13	252,16	243,52	257,36	706,46
Curva Média Força - Extensão (VCM)	60,48	23,60	291,82	254,26	241,59	256,27	707,36
(VM - VCM) / VM (%)	0,38	0,00	3,07	0,83	0,79	0,42	0,13

Por último, é apresentado um quadro no qual é feita a comparação dos valores da perda de resistência à tracção, entre os valores obtidos a partir da média dos provetes ensaiados e os valores obtidos através da curva média força-extensão (Quadro 4.34).

Quadro 4.34 – Comparação entre os valores obtidos, para a perda de resistência à tracção a partir da média dos resultados de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100A LISA DF.

GC100A LISA DF	Intacto T (kN/m)	Abrasão T (kN/m)	Perda de Resistência à Tracção (%)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	97,84	60,25	38,42
Curva Média Força - Extensão (VCM)	92,07	60,48	34,31
(VM - VCM) / VM (%)	5,90	0,38	10,69

Com base nos resultados apresentados nos Quadros 4.33 e 4.34 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) – Os valores da curva média são praticamente idênticos ao da média dos valores obtidos para os provetes, regista-se uma diferença de 0,38% entre ambos.

  Relativamente à perda de resistência à tracção, analisando a média dos provetes ensaiados, verifica-se que este geocompósito quando ensaiado na direcção de fabrico, diminuiu a sua resistência à tracção comparativamente aos valores da média dos provetes intactos. Neste caso a perda de resistência à tracção foi de 38,42%.

  Refira-se que a perda de resistência à tracção pela análise da curva média (34,31%) é inferior à obtida pela média dos provetes.

  Conforme se constata pela análise da média dos provetes ensaiados, a perda de resistência à tracção obtida para o geocompósito com a face sem filamentos de PET sujeita à abrasão (38,42%), conduziu a resultados muito abaixo dos obtidos no caso do geocompósito com a face com filamentos de PET sujeita à abrasão (76,61%).

  Este facto demonstra que para este geocompósito, ensaiado na direcção de fabrico, a abrasão da face com filamentos PET diminui a resistência à tracção de forma mais acentuada que a abrasão na face sem filamentos de PET.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) - A extensão na carga máxima obtida para o geocompósito cuja face sem filamentos de PET foi submetida à abrasão (23,60%) é superior à extensão na carga máxima obtida para o geocompósito com a face com filamentos de PET sujeita à abrasão (15,03%).

- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para todas as rigidezes secantes são bastante próximos entre eles.

  No que se refere a aproximação da curva média à média dos provetes ensaiados conclui-se que para todas as rigidezes secantes a aproximação é muito fiável.

  Os valores obtidos neste ensaio revelam bastante constância entre eles, contrapondo-se à tendência crescente com a extensão dos valores obtidos para as rigidezes com o geocompósito em que a face com filamentos de PET foi submetida à abrasão. Registe-se também que as rigidezes secantes obtidas para este último geocompósito são inferiores às que foram registadas para a geocompósito com a face sem filamentos de PET sujeita à abrasão.

- Robustez – Os valores obtidos para a robustez permitem classificar este geocompósito, ensaiado na direcção de fabrico, como rígido e frágil, derivado da sua resistência máxima ser elevada e obtida para uma baixa extensão.

  A curva média apresenta valores muito idênticos à média dos provetes ensaiados sendo a diferença registada de 0,13%.

  A robustez média do geocompósito com a face com filamentos de PET submetida à abrasão é de 165,92 kN/m, os valores obtidos para o mesmo parâmetro no caso do geocompósito com a face sem filamentos de PET submetida à abrasão são bem mais elevados (706,46 kN/m).

4.5. Ensaio de Abrasão Precedido de Punçoamento Dinâmico

Neste ponto são apresentados os resultados obtidos no ensaio de abrasão para provetes previamente submetidos ao ensaio de punçoamento dinâmico.

O ensaio de punçoamento dinâmico foi realizado mediante as especificações da norma NP EN ISO 13433:2008.

Após a realização deste ensaio, os provetes foram submetidos à abrasão, seguindo a norma anteriormente descrita (NP EN ISO 13427:2006).

Esta última prevê a realização do ensaio de tracção pela norma prEN ISO 13934-1 (Determinação da força máxima e alongamento à força máxima pelo método da tira para geotêxteis), no entanto, analogamente ao que aconteceu para os provetes ensaiados exclusivamente à abrasão, optou-se pela realização do ensaio de tracção segundo a norma NP EN ISO 10319:2005.

Adoptando sempre a mesma norma para o ensaio de tracção, permite estabelecer comparações entre os valores obtidos de resistência à tracção para cada uma das danificações induzidas.

Para o ensaio de punçoamento dinâmico a norma prevê o cálculo do seguinte item:

- Média do diâmetro do orifício

O resultado obtido é acompanhado de uma análise estatística composta pelo desvio padrão e o coeficiente de variação da amostra ensaiada.

A amostra é constituída por 5 provetes.

Para o ensaio de abrasão, precedido de punçoamento dinâmico, os resultados e grandezas apresentados são os definidos na norma NP EN ISO 13427:2006, uma vez que é esta a norma de ensaio seguida.

4.5.1. Resultados dos Geocompósitos Ensaiados

Analogamente aos ensaios referidos anteriormente, a apresentação dos resultados dos geocompósitos ensaiados, será dividida por tipo de geocompósito e direcção de ensaio.

4.5.1.1. Geocompósito GC50 – Face Filamentos de PET - Direcção Perpendicular à de Fabrico (DPF)

Ensaio de Punçoamento Dinâmico

No Quadro 4.35 apresentam-se os resultados do ensaio de punçoamento dinâmico dos 5 provetes de geocompósito GC50.

A nomenclatura utilizada para designar o ensaio deste geocompósito foi GC50P DPF.

Quadro 4.35 – Valores obtidos no ensaio de punçoamento dinâmico para os provetes de geocompósito GC50P DPF.

GC50P DPF	Diâmetro (mm)
Provete 1	18,00
Provete 2	19,00
Provete 3	19,00
Provete 4	20,00
Provete 5	19,00
Média	19,00
Desvio Padrão	0,71
Coef. Variação (%)	3,72

Ensaio de Abrasão Precedido de Punçoamento Dinâmico

No gráfico força-extensão da Figura 4.16 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 5 provetes do geocompósito GC50, cuja face com filamentos de PET foi submetida à abrasão. O geocompósito foi ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico.

Uma vez que os provetes antes de serem ensaiados à abrasão foram submetidos ao ensaio de punçoamento dinâmico, a nomenclatura utilizada para designar este ensaio foi GC50PA PET DPF.

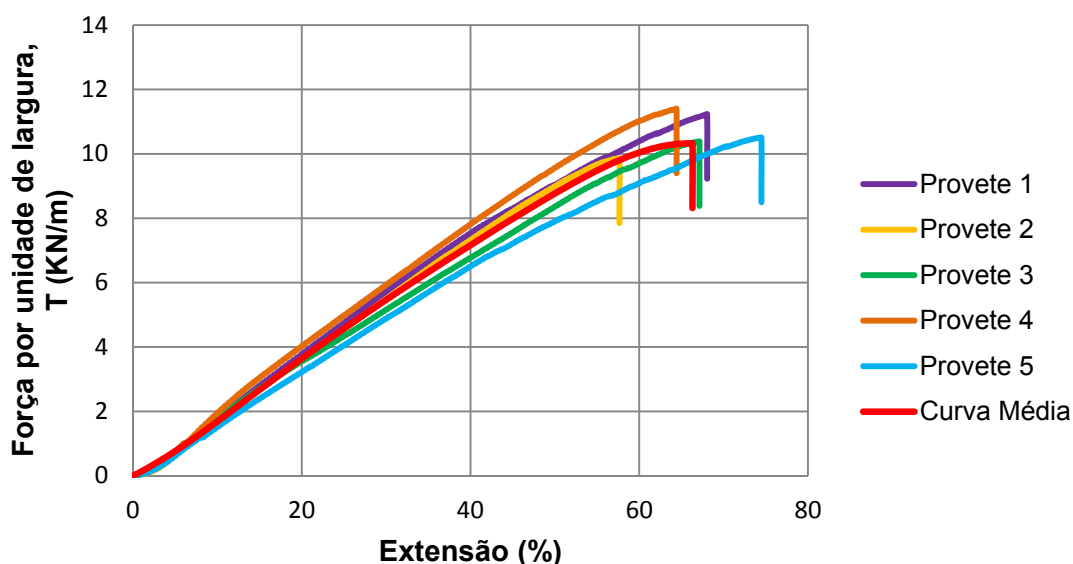



Fig. 4.16 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC50PA PET DPF.

De seguida é apresentado o quadro resumo com os valores obtidos nos ensaios (Quadro 4.36) e o quadro de comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão (Quadro 4.37).

Quadro 4.36 – Valores obtidos no ensaio de tracção a provetes submetidos a punçoamento dinâmico seguido de abrasão, para o geocompósito GC50PA PET DPF.

GC50PA PET DPF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Provete 1	11,23	68,06	7,95	13,85	17,60	16,50	428,09
Provete 2	9,85	57,47	5,76	12,51	16,93	17,14	296,17
Provete 3	10,38	67,15	6,98	13,57	17,65	15,46	376,06
Provete 4	11,40	64,43	7,94	15,00	19,53	17,69	396,81
Provete 5	10,50	74,49	6,66	12,30	15,15	14,10	428,09
Média	10,67	66,32	7,06	13,45	17,37	16,18	385,04
Desvio Padrão	0,64	6,17	0,93	1,09	1,58	1,43	54,37
Coef. Variação (%)	5,97	9,30	13,14	8,13	9,08	8,83	14,12

Quadro 4.37 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes submetidos a punçoamento dinâmico seguido de abrasão e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50PA PET DPF.

GC 50PA PET DPF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	10,67	66,32	7,06	13,45	17,37	16,18	385,04
Curva Média Força - Extensão (VCM)	10,32	66,32	13,84	15,25	16,87	15,56	382,42
(VM - VCM) / VM (%)	3,29	0,00	96,06	13,42	2,89	3,80	0,68

No Quadro 4.38 são comparados os valores obtidos no ensaio de tracção para provetes intactos e para os provetes submetidos a punçoamento dinâmico seguido de abrasão, tendo sido calculada a perda de resistência à tracção para cada um deles.

Quadro 4.38 – Perda de resistência à tracção obtida para cada um dos provetes ensaiados, de geocompósito GC50PA PET DPF.

GC50PA PET DPF	**Intacto** **T** (kN/m)	**Punçoamento Dinâmico Abrasão** **T** (kN/m)	**Perda de Resistência à Tracção** (%)
Provete 1	13,89	11,23	19,14
Provete 2	15,75	9,85	37,47
Provete 3	16,04	10,38	35,28
Provete 4	15,14	11,40	24,74
Provete 5	14,03	10,50	25,15
Média	14,97	10,67	28,35
Desvio Padrão	0,98	0,64	7,73
Coef. Variação (%)	6,56	5,97	27,28

Por último, é apresentado o Quadro 4.39 no qual é feita a comparação dos valores da perda de resistência à tracção, entre os valores obtidos a partir da média dos provetes ensaiados e os valores obtidos através da curva média força-extensão.

Quadro 4.39 – Comparação entre os valores obtidos, para a perda de resistência à tracção a partir da média dos resultados de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50PA PET DPF.

GC50PA PET DPF	**Intacto** **T** (kN/m)	**Punçoamento Dinâmico Abrasão** **T** (kN/m)	**Perda de Resistência à Tracção** (%)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	14,97	10,67	28,71
Curva Média Força - Extensão (VCM)	15,16	10,32	31,92
(VM - VCM) / VM (%)	1,27	3,29	11,18

Analisando os Quadros 4.36 a 4.39 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) - Os valores obtidos para cada um dos provetes foram bastante idênticos entre si (coeficiente de variação de 5,97%). O valor da curva média é praticamente idêntico ao da média dos valores obtidos para cada provete, regista-se uma diferença de apenas 3,29% entre ambos.

  Relativamente à perda de resistência à tracção, analisando a média dos provetes ensaiados, verifica-se que este geocompósito, quando ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico,

diminuiu a sua resistência à tracção comparativamente aos valores da média dos provetes intactos. Neste caso a perda de resistência à tracção foi de 28,71%.

Refira-se que a perda de resistência à tracção pela análise da curva média (31,92%) apresenta algumas diferenças (11,18%) relativamente à média dos provetes ensaiados, no entanto qualquer um dos valores demonstra o efeito do punçoamento dinâmico na diminuição da resistência à tracção deste geocompósito, quando ensaiado na direcção considerada.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam alguma variação entre eles (coeficiente de variação de 9,30%). A extensão na carga máxima obtida apresenta valores inferiores à verificada para os provetes intactos.

- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5% e 10% são crescentes com a extensão, sendo que o da ε_{Fmax} é inferior ao de 10%. Refira-se que para a rigidez secante a 2% existe um desvio entre a média dos provetes ensaiados e o valor obtido a partir da curva média, variação de 96,06%, o que revela que para as extensões iniciais a aproximação da curva média à média dos resultados obtidos é pouco fiável. Para as restantes rigidezes secantes esta variação é menos significativa, verifica-se uma diferença de 13,42% para a rigidez secante a 5%, sendo que para as rigidezes a 10 % e para a ε_{Fmax} o desvio entre a curva média e a média dos provetes ensaiados é quase inexistente.

  Comparando os valores das rigidezes secantes obtidos para os provetes deste ensaio com os obtidos para provetes intactos conclui-se que os valores são ligeiramente mais baixos, embora da mesma ordem de grandeza, evidenciando também a de crescimento com a extensão.

- Robustez – Contrariamente aos valores obtidos para os provetes intactos, os valores da robustez no ensaio em análise são baixos, acompanhando os valores obtidos para a extensão na carga máxima. Mediante os valores obtidos, o geocompósito, ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico, apresenta um comportamento flexível.

  O coeficiente de variação (14,12%) revela variabilidade entre os valores obtidos para cada provete ensaiado, sendo no entanto o valor obtido através da curva média praticamente idêntico à média dos provetes ensaiados, diferença de 0,68%.

4.5.1.2. Geocompósito GC50 – Face Filamentos de PET - Direcção de Fabrico (DF)

Ensaio de Punçoamento Dinâmico

No Quadro 4.40 apresentam-se os resultados do ensaio de punçoamento dinâmico dos 5 provetes de geocompósito GC50.

A nomenclatura utilizada para designar o ensaio deste geocompósito foi GC50P DF.

Quadro 4.40 – Valores obtidos no ensaio de punçoamento dinâmico para os provetes de geocompósito GC50P DF.

GC50P DF	Diâmetro (mm)
Provete 1	16,00
Provete 2	17,00
Provete 3	16,00
Provete 4	12,00
Provete 5	18,00
Média	15,80
Desvio Padrão	2,28
Coef. Variação (%)	14,43

Ensaio de Abrasão Precedido de Punçoamento Dinâmico

No gráfico força-extensão da Figura 4.17, apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 5 provetes do geocompósito GC50, cuja face dos filamentos de PET foi submetida à abrasão. O geocompósito foi ensaiado na direcção de fabrico.

Uma vez que os provetes antes de serem ensaiados à abrasão foram submetidos ao ensaio de punçoamento dinâmico, a nomenclatura utilizada para designar este ensaio foi GC50PA PET DF.

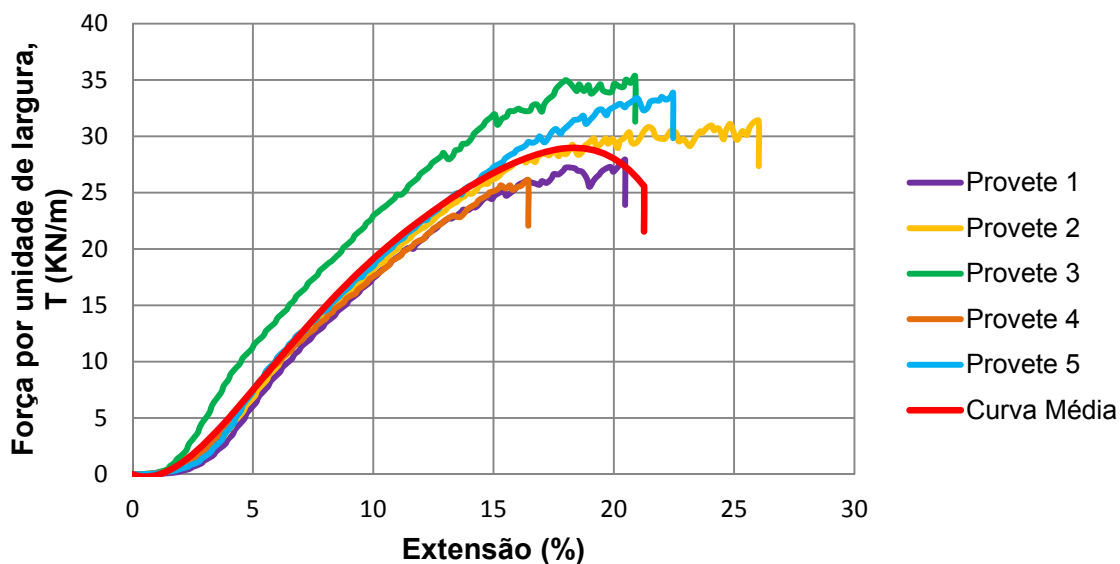



Fig. 4.17 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC50PA PET DF.

De seguida é apresentado o Quadro 4.41 com o resumo dos valores obtidos nos ensaios e o Quadro 4.42 com a comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão.

Quadro 4.41 – Valores obtidos no ensaio de tracção a provetes submetidos a punçoamento dinâmico seguido de abrasão, para o geocompósito GC50PA PET DF.

GC50PA PET DF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Provete 1	27,91	20,47	14,07	121,01	173,93	136,30	319,09
Provete 2	31,35	26,03	34,70	135,23	181,69	120,46	510,38
Provete 3	35,30	20,89	81,27	226,30	229,34	168,94	440,99
Provete 4	26,07	16,45	31,20	149,91	175,54	158,53	219,28
Provete 5	33,84	22,47	24,09	147,24	184,91	150,63	424,70
Média	30,89	21,26	37,07	155,94	189,08	146,97	382,89
Desvio Padrão	3,89	3,47	25,94	40,96	22,94	19,02	114,25
Coef. Variação (%)	12,59	16,31	69,97	26,27	12,13	12,94	29,84

Quadro 4.42 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes submetidos a punçoamento dinâmico seguido de abrasão e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50PA PET DF.

GC 50PA PET DF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	30,89	21,26	37,07	155,94	189,08	146,97	382,89
Curva Média Força - Extensão (VCM)	25,56	21,26	48,17	149,55	191,11	120,22	371,83
(VM - VCM) / VM (%)	17,27	0,01	29,96	4,10	1,07	18,20	2,89

No Quadro 4.43 são comparados os valores obtidos no ensaio de tracção para provetes intactos e para os provetes submetidos a punçoamento dinâmico seguido de abrasão, tendo sido calculada a perda de resistência à tracção para cada um deles.

Quadro 4.43 – Perda de resistência à tracção obtida para cada um dos provetes ensaiados, de geocompósito GC50PA PET DF.

GC50PA PET DF	**Intacto** **T** (kN/m)	**Punçoamento Dinâmico Abrasão** **T** (kN/m)	**Perda de Resistência à Tracção** (%)
Provete 1	56,35	27,91	50,48
Provete 2	60,70	31,35	48,35
Provete 3	57,39	35,30	38,49
Provete 4	63,13	26,07	58,70
Provete 5	54,09	33,84	37,44
Média	58,33	30,89	46,69
Desvio Padrão	3,58	3,89	8,86
Coef. Variação (%)	6,14	12,59	18,98

Por último, é apresentado um quadro no qual é feita a comparação dos valores da perda de resistência à tracção, entre os valores obtidos a partir da média dos provetes ensaiados e os valores obtidos através da curva média força-extensão (Quadro 4.44).

Quadro 4.44 – Comparação entre os valores obtidos, para a perda de resistência à tracção a partir da média dos resultados de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC50PA PET DF.

GC50PA PET DF	**Intacto** **T** (kN/m)	**Punçoamento Dinâmico Abrasão** **T** (kN/m)	**Perda de Resistência à Tracção** (%)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	58,33	30,89	47,04
Curva Média Força - Extensão (VCM)	57,13	25,56	55,26
(VM - VCM) / VM (%)	2,06	17,27	17,48

Analisando os Quadros 4.41 a 4.44 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) - Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam bastante variabilidade entre si (coeficiente de variação de 12.59%). O valor da curva média apresenta alguns desvios relativamente ao da média dos valores obtidos para cada provete, sendo o desvio de 17,27%.

  Relativamente à perda de resistência à tracção, analisando a média dos provetes ensaiados, verifica-se que este geocompósito quando ensaiado na direcção de fabrico, diminui a sua

resistência à tracção comparativamente aos valores da média dos provetes intactos. A perda de resistência à tracção registada foi de 47,04%.

Refira-se que a perda de resistência à tracção pela análise da curva média (55,26%) apresenta algumas diferenças (17,48%) relativamente à média dos provetes ensaiados, no entanto qualquer um dos valores demonstra o efeito do punçoamento dinâmico na diminuição da resistência à tracção deste geocompósito, quando ensaiado na direcção de fabrico.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam alguma variação entre eles, conforme se constata pelo coeficiente de variação (16,31%). A extensão na carga máxima obtida apresenta valores ligeiramente inferiores à verificada para os provetes intactos. Observa-se que as danificações induzidas pelo punçoamento dinâmico e pela abrasão quase não tem expressão na variação da extensão máxima.
- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5%, 10% são crescentes com a extensão, sendo que o da ε_{Fmax} é inferior ao de 10%. Os valores crescentes com a extensão revelam que o aumento da resistência à tracção foi superior aos incrementos de extensão. O coeficiente de variação indicia grande dispersão de valores para todas as extensões, sendo o valor máximo registado para este coeficiente obtido para a extensão de 2%.

  No que se refere a aproximação da curva média à média dos provetes ensaiados conclui-se que, com excepção da rigidez secante a 2% (variação de 29,96%) e da rigidez secante para a extensão máxima (18,20%), as restantes rigidezes apresentam uma aproximação muito fiável (variação máxima de 4,10%).

  Os valores da rigidez secante são inferiores aos obtidos no caso do material intacto, observando-se a mesma tendência de crescimento do parâmetro com a extensão.
- Robustez – Os valores obtidos para a robustez permitem classificar este geocompósito, ensaiado na direcção de fabrico, como flexível.

  O coeficiente de variação (29,84%) revela grande variabilidade entre os valores obtidos para cada provete ensaiado. A diferença entre o valor obtido através da curva média e a média dos provetes ensaiados é praticamente inexistente, diferença de 2,89%.

4.5.1.3. Geocompósito GC100 – Face Filamentos de PET - Direcção Perpendicular à de Fabrico (DPF)

Ensaio de Punçoamento Dinâmico

No Quadro 4.45 apresentam-se os resultados do ensaio de punçoamento dinâmico dos 5 provetes de geocompósito GC100.

A nomenclatura utilizada para designar o ensaio deste geocompósito foi GC100P DPF.

Quadro 4.45 – Valores obtidos no ensaio de punçoamento dinâmico para os provetes de geocompósito GC100P DPF.

GC100P DPF	Diâmetro (mm)
Provete 1	16,00
Provete 2	15,00
Provete 3	15,00
Provete 4	16,00
Provete 5	16,00
Média	15,60
Desvio Padrão	0,55
Coef. Variação (%)	3,51

Ensaio de Abrasão Precedido de Punçoamento Dinâmico

No gráfico força-extensão da Figura 4.18 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 5 provetes do geocompósito GC100, cuja face com filamentos de PET foi submetida à abrasão. O geocompósito foi ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico.
Uma vez que os provetes antes de serem ensaiados à abrasão foram submetidos ao ensaio de punçoamento dinâmico, a nomenclatura utilizada para designar este ensaio foi GC100PA PET DPF.

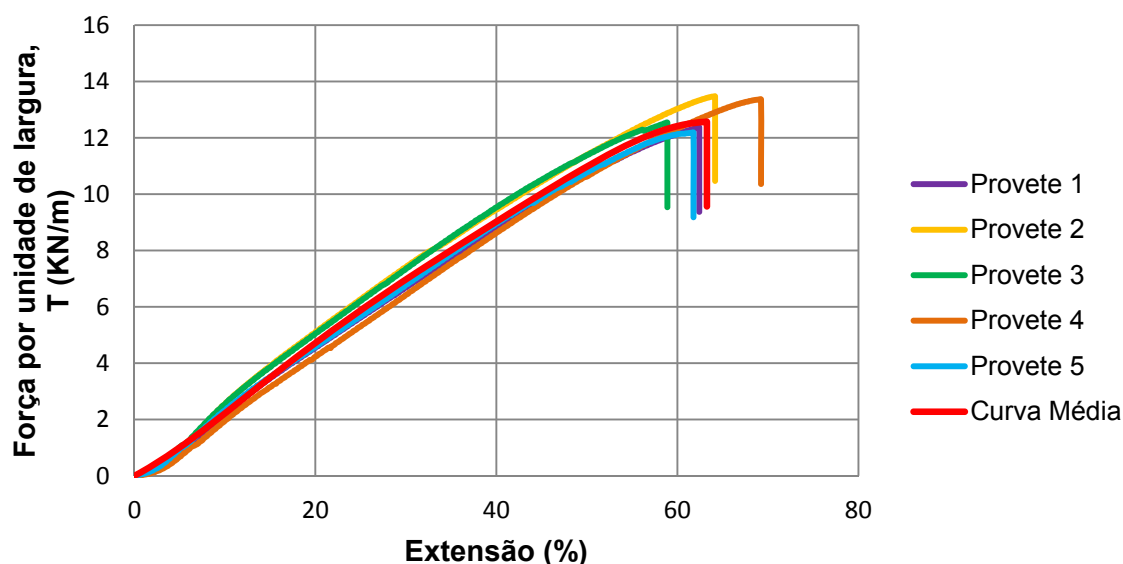



Fig. 4.18 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC100PA PET DPF.

De seguida é apresentado o Quadro 4.46 com o resumo dos valores obtidos nos ensaios e o Quadro 4.47 com a comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão.

Quadro 4.46 – Valores obtidos no ensaio de tracção a provetes submetidos a punçoamento dinâmico seguido de abrasão, para o geocompósito GC100PA PET DPF.

GC100PA PET DPF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Provete 1	12,37	62,42	7,48	16,36	22,11	19,82	418,81
Provete 2	13,47	64,16	7,64	19,09	25,44	20,99	478,08
Provete 3	12,54	58,89	8,99	20,29	25,40	21,29	407,41
Provete 4	13,36	69,25	5,47	13,35	19,54	19,29	498,53
Provete 5	12,18	61,59	9,13	19,08	23,26	19,78	413,62
Média	12,78	63,26	7,74	17,63	23,15	20,23	443,29
Desvio Padrão	0,59	3,85	1,48	2,80	2,47	0,86	41,92
Coef. Variação (%)	4,63	6,08	19,10	15,86	10,68	4,25	9,46

Quadro 4.47 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes submetidos a punçoamento dinâmico seguido de abrasão e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100PA PET DPF.

GC 100PA PET DPF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	12,78	63,26	7,74	17,63	23,15	20,23	443,29
Curva Média Força - Extensão (VCM)	12,57	63,26	18,07	20,04	22,17	19,87	442,69
(VM - VCM) / VM (%)	1,69	0,00	133,39	13,63	4,21	1,81	0,14

No Quadro 4.48 são comparados os valores obtidos no ensaio de tracção para provetes intactos e para os provetes submetidos a punçoamento dinâmico seguido de abrasão, tendo sido calculada a perda de resistência à tracção para cada um deles.

Quadro 4.48 – Perda de resistência à tracção obtida para cada um dos provetes ensaiados, de geocompósito GC100PA PET DPF.

GC100PA PET DPF	**Intacto** **T** (kN/m)	**Punçoamento Dinâmico Abrasão** **T** (kN/m)	**Perda de Resistência à Tracção** (%)
Provete 1	13,98	12,37	11,55
Provete 2	14,61	13,47	7,82
Provete 3	14,72	12,54	14,82
Provete 4	14,44	13,36	7,47
Provete 5	15,42	12,18	21,03
Média	14,63	12,78	12,54
Desvio Padrão	0,52	0,59	5,62
Coef. Variação (%)	3,57	4,63	44,81

Por último, é feita no Quadro 4.49 a comparação dos valores da perda de resistência à tracção, entre os valores obtidos a partir da média dos provetes ensaiados e os valores obtidos através da curva média força-extensão.

Quadro 4.49 – Comparação entre os valores obtidos, para a perda de resistência à tracção a partir da média dos resultados de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100PA PET DPF.

GC100PA PET DPF	**Intacto** **T** (kN/m)	**Punçoamento Dinâmico Abrasão** **T** (kN/m)	**Perda de Resistência à Tracção** (%)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	14,63	12,78	12,65
Curva Média Força - Extensão (VCM)	14,43	12,57	12,91
(VM - VCM) / VM (%)	1,39	1,69	2,07

Analisando os Quadros 4.46 a 4.49 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) - Os valores obtidos para cada um dos provetes foram bastante idênticos entre si (coeficiente de variação de 4,63%). O valor da curva média é praticamente idêntico ao da média dos valores obtidos para cada provete, regista-se uma diferença de apenas 1,69% entre ambos.

  Relativamente à perda de resistência à tracção, analisando a média dos provetes ensaiados, verifica-se que este geocompósito quando ensaiado na direcção perpendicular à de fabrico

diminuiu a sua resistência à tracção comparativamente aos valores da média dos provetes intactos. Neste caso a perda de resistência à tracção foi de 12,65%.

Refira-se que a perda de resistência à tracção pela análise da curva média (12,91%) é praticamente idêntica à obtida pela média dos provetes.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam alguma variação entre eles (coeficiente de variação de 6,08%). A extensão na carga máxima apresenta valores inferiores à verificada para os provetes intactos.
- Rigidez secante (Jsec) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5% e 10% são crescentes, sendo que o da ε_{Fmax} é inferior ao de 10%.

  O coeficiente de variação revela alguma dispersão de valores entre os resultados obtidos para todas as extensões, sendo o valor máximo registado para a extensão de 2%.

  No que se refere a aproximação da curva média à média dos provetes ensaiados conclui-se que, com excepção da rigidez secante a 2% (variação de 133,39%) e da rigidez secante a 5% (variação de 13,63%), as restantes apresentam uma aproximação fiável (desvio máximo 4,21%).

  Os valores da rigidez secante são superiores (embora da mesma ordem de grandeza) aos obtidos no caso do material intacto, observando-se a mesma tendência de crescimento do parâmetro com a extensão.
- Robustez – Contrariamente aos valores obtidos para os provetes intactos, os valores da robustez deste ensaio são baixos, acompanhando os valores registados para a extensão na carga máxima. Mediante os valores obtidos, o geocompósito, ensaiado na direcção em consideração, apresenta um comportamento que poderá ser classificado de flexível.

  O coeficiente de variação (9,46%) revela variabilidade entre os valores obtidos para cada provete ensaiado, sendo no entanto o valor obtido através da curva média praticamente idêntico à média dos provetes ensaiados, diferença de 0,14%.

4.5.2. Geocompósito GC100 – Face Filamentos de PET - Direcção de Fabrico (DF)

Ensaio de Punçoamento Dinâmico

No Quadro 4.50 apresentam-se os resultados do ensaio de punçoamento dinâmico dos 5 provetes de geocompósito GC100.

A nomenclatura utilizada para designar o ensaio deste geocompósito foi GC100P DF.

Quadro 4.50 – Valores obtidos no ensaio de punçoamento dinâmico para os provetes de geocompósito GC100P DF.

GC100P DF	Diâmetro (mm)
Provete 1	12,00
Provete 2	13,00
Provete 3	14,00
Provete 4	16,00
Provete 5	14,00
Média	13,80
Desvio Padrão	1,48
Coef. Variação (%)	10,75

Ensaio de Abrasão Precedido de Punçoamento Dinâmico

No gráfico força-extensão da Figura 4.19 apresentam-se os resultados do ensaio de tracção-extensão dos 5 provetes do geocompósito GC100, cuja face com filamentos de PET foi submetida à abrasão. O geocompósito foi ensaiado na direcção de fabrico.
Uma vez que os provetes antes de serem ensaiados à abrasão foram submetidos ao ensaio de punçoamento dinâmico, a nomenclatura utilizada para designar este ensaio foi GC100PA PET DF.

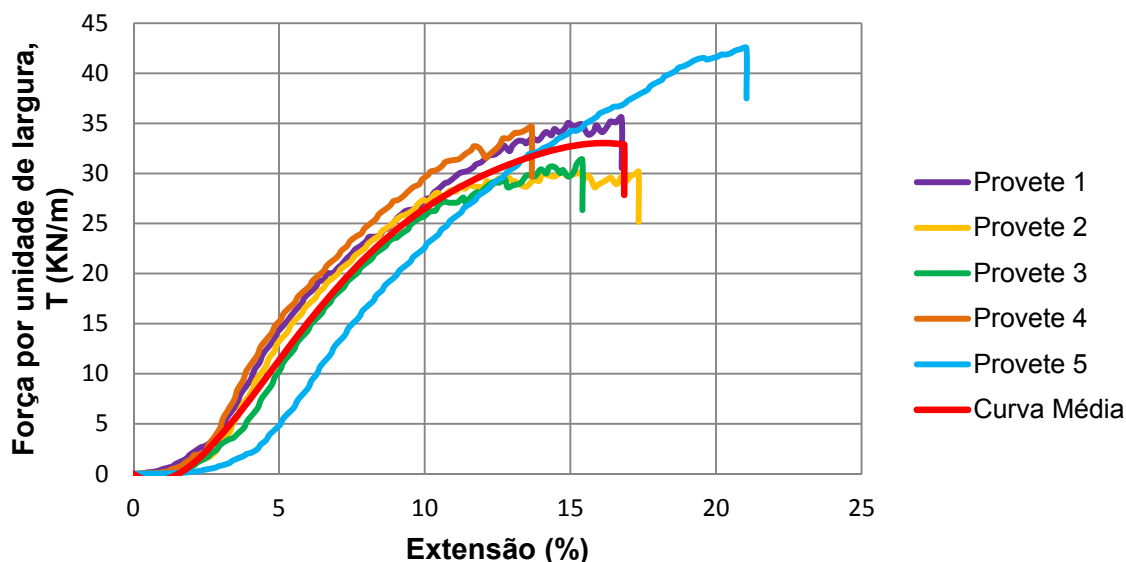



Fig. 4.19 – Curvas força-extensão de cada um dos provetes ensaiados e curva força-extensão média da amostra, para o geocompósito GC100PA PET DF.

De seguida é apresentado o Quadro 4.51 com o resumo dos valores obtidos nos ensaios e o Quadro 4.52 com a comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão.

Quadro 4.51 – Valores obtidos no ensaio de tracção a provetes submetidos a punçoamento dinâmico seguido de abrasão, para o geocompósito GC100PA PET DF.

GC100PA PET DF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Provete 1	35,54	16,76	101,65	286,62	273,58	212,03	350,72
Provete 2	30,16	17,35	50,99	263,97	272,98	173,87	337,27
Provete 3	31,34	15,41	38,35	204,64	257,37	203,31	265,00
Provete 4	34,68	13,68	77,57	304,47	295,94	253,54	265,00
Provete 5	42,49	21,05	10,01	96,45	225,94	201,88	457,54
Média	34,84	16,85	55,71	231,23	265,16	208,92	335,11
Desvio Padrão	4,83	2,74	35,36	84,23	25,88	28,77	79,16
Coef. Variação (%)	13,86	16,25	63,46	36,43	9,76	13,77	23,62

Quadro 4.52 – Comparação entre os valores obtidos a partir da média dos resultados individuais de cada um dos provetes submetidos a punçoamento dinâmico seguido de abrasão e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100PA PET DF.

GC 100PA PET DF	**T** (kN/m)	**ε_{Fmax}** (%)	**J_{sec} 2%** (kN/m)	**J_{sec} 5%** (kN/m)	**J_{sec} 10%** (kN/m)	**J_{sec} ε_{Fmax}** (kN/m)	**Robustez** (kN/m)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	34,84	16,85	55,71	231,23	265,16	208,92	335,11
Curva Média Força - Extensão (VCM)	32,86	16,85	45,81	226,95	265,06	195,02	327,42
(VM - VCM) / VM (%)	5,68	0,00	17,77	1,85	0,04	6,66	2,29

No Quadro 4.53 são comparados os valores obtidos no ensaio de tracção para provetes intactos e para os provetes submetidos a punçoamento dinâmico seguido de abrasão, tendo sido calculada a perda de resistência à tracção para cada um deles.

Quadro 4.53 – Perda de resistência à tracção obtida para cada um dos provetes ensaiados, de geocompósito GC100PA PET DF.

GC100PA PET DF	**Intacto** **T** (kN/m)	**Punçoamento Dinâmico Abrasão** **T** (kN/m)	**Perda de Resistência à Tracção** (%)
Provete 1	90,38	35,54	60,67
Provete 2	97,60	30,16	69,10
Provete 3	109,34	31,34	71,34
Provete 4	97,12	34,68	64,30
Provete 5	94,75	42,49	55,15
Média	97,84	34,84	64,11
Desvio Padrão	7,04	4,83	6,50
Coef. Variação (%)	7,19	13,86	10,14

Por último, é feita, no Quadro 4.54, a comparação dos valores da perda de resistência à tracção, entre os valores obtidos a partir da média dos provetes ensaiados e os valores obtidos através da curva média força-extensão.

Quadro 4.54 – Comparação entre os valores obtidos, para a perda de resistência à tracção a partir da média dos resultados de cada um dos provetes e os valores da curva média força-extensão, para o geocompósito GC100PA PET DF.

GC100PA PET DF	**Intacto** **T** (kN/m)	**Punçoamento Dinâmico Abrasão** **T** (kN/m)	**Perda de Resistência à Tracção** (%)
Média dos Provetes Ensaiados (VM)	97,84	34,84	64,39
Curva Média Força - Extensão (VCM)	92,07	32,86	64,31
(VM - VCM) / VM (%)	5,90	5,68	0,12

Analisando os Quadros 4.51 a 4.54 verifica-se que:

- Resistência à tracção (T) - Os valores obtidos para cada um dos provetes são bastante variáveis, conforme se constata pelo coeficiente de variação (13,86%). O valor da curva média apresenta alguns desvios relativamente ao da média dos valores obtidos para cada provete, sendo a diferença de 5,68%.

  A resistência à tracção (avaliada em termos da média dos valores dos provetes), diminui relativamente ao material intacto, sendo a perda de resistência à tracção foi de 64,39%.

Refira-se que a perda de resistência à tracção avaliada através da curva média (64.31%) é praticamente idêntica à obtida pela média dos provetes.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – Os valores obtidos para cada um dos provetes apresentam alguma variação entre eles, conforme se constata pelo coeficiente de variação (16,25%). A extensão na carga máxima obtida é quase metade da verificada para os provetes intactos.

- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores obtidos para a rigidez secante a 2%; 5% e 10% são crescentes com a extensão, sendo que o da ε_{Fmax} é inferior ao de 10%.

  Os valores crescentes da rigidez revelam que o aumento da resistência à tracção foi superior aos incrementos de extensão

  O coeficiente de variação indicia alguma dispersão de valores entre os resultados obtidos para todas as extensões, sendo o valor máximo registado, 63,46%, para a extensão de 2%.

  No que se refere a aproximação da curva média à média dos provetes ensaiados conclui-se que com excepção da rigidez secante a 2% (variação de 17,77%), as restantes apresentam uma aproximação muito fiável (variação máxima de 6,66%).

  Comparando os valores registados para a rigidez secante com os obtidos para o material intacto verifica-se que a rigidez secante a 2% e ε_{Fmax} é superior no material intacto. Para as restantes rigidezes os valores são da mesma ordem de grandeza. A tendência de aumento dos valores das rigidezes com a extensão (exceptuando para a ε_{Fmax}) mantém-se no material intacto e danificado.

- Robustez – Os valores da robustez são baixos do que para o material intacto, acompanhando os valores obtidos para a extensão na carga máxima, apresentando o geocompósito danificado um comportamento que pode ser considerado flexível.

  O coeficiente de variação (23,62%) revela variabilidade entre os valores obtidos para cada provete ensaiado, sendo no entanto o valor obtido através da curva média praticamente idêntico à média dos provetes ensaiados, diferença de 2,29%.

4.6. COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Nesta secção apresenta-se para cada geocompósito e respectiva direcção de ensaio, a comparação entre os resultados obtidos para o material intacto e os obtidos após abrasão e abrasão precedido de punçoamento dinâmico. Os ensaios de abrasão acima mencionados são referentes à face com filamentos PET, visto que foi nesta face que a danificação dos geocompósitos teve resultados mais expressivos quando comparados com os obtidos para a face sem filamentos em PET.

4.6.1. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A comparação entre os resultados obtidos é feita através da curva média obtida em cada um dos ensaios.

São também apresentados três gráficos de barras. Num deles é comparada, para os vários ensaios, a resistência à tracção e respectiva perda de resistência à tracção tendo como referência o valor obtido pela curva média dos provetes intactos para a resistência à tracção. Neste mesmo gráfico é também comparada, para os vários ensaios, a extensão para a carga máxima e a respectiva perda de extensão

para a carga máxima tendo como referência o valor obtido pela curva média dos provetes intactos para a extensão máxima.

No segundo gráfico de barras são comparadas, para os vários ensaios, as rigidezes secantes para as extensões 2%, 5%, 10% e ε_{Fmax}.

Ao contrário das outras grandezas, para as rigidezes secantes não foram calculadas as respectivas perdas. Tal facto é devido aos elevados coeficientes de variação, em especial da rigidez de 2% e 5%, obtidos os quais não permitem uma comparação fiável de resultados. Assim, optou-se neste gráfico por se apresentarem as rigidezes secantes obtidas através da curva média de cada ensaio.

No terceiro gráfico de barras é comparada a robustez e respectiva perda de robustez, entre os vários ensaios. O valor de referência usado para a robustez foi o valor obtido pela curva média dos provetes intactos.

4.6.1.1. Geocompósito GC50 – Direcção Perpendicular à de Fabrico (DPF)

No gráfico força-extensão da Figura 4.20 apresentam-se os resultados das curvas médias obtidas nos ensaios do geocompósito GC50 na direcção perpendicular à de fabrico. Para efeitos de comparação é também apresentada a curva média obtida no ensaio dos provetes intactos.

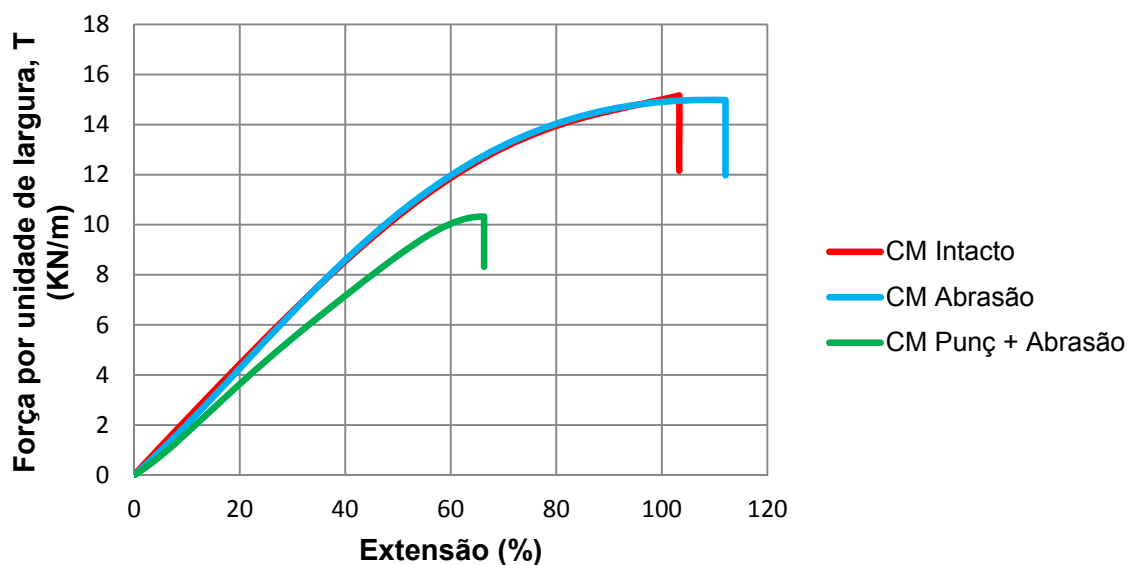



Fig. 4.20 – Curvas médias de força-extensão para o material: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico

Na Figura 4.21 compara-se a resistência à tracção e a respectiva perda de resistência à tracção, bem como a extensão para a carga máxima e a correspondente perda de extensão para a carga máxima, considerando o material intacto, sujeito à abrasão e sujeito à abrasão após punçoamento dinâmico.

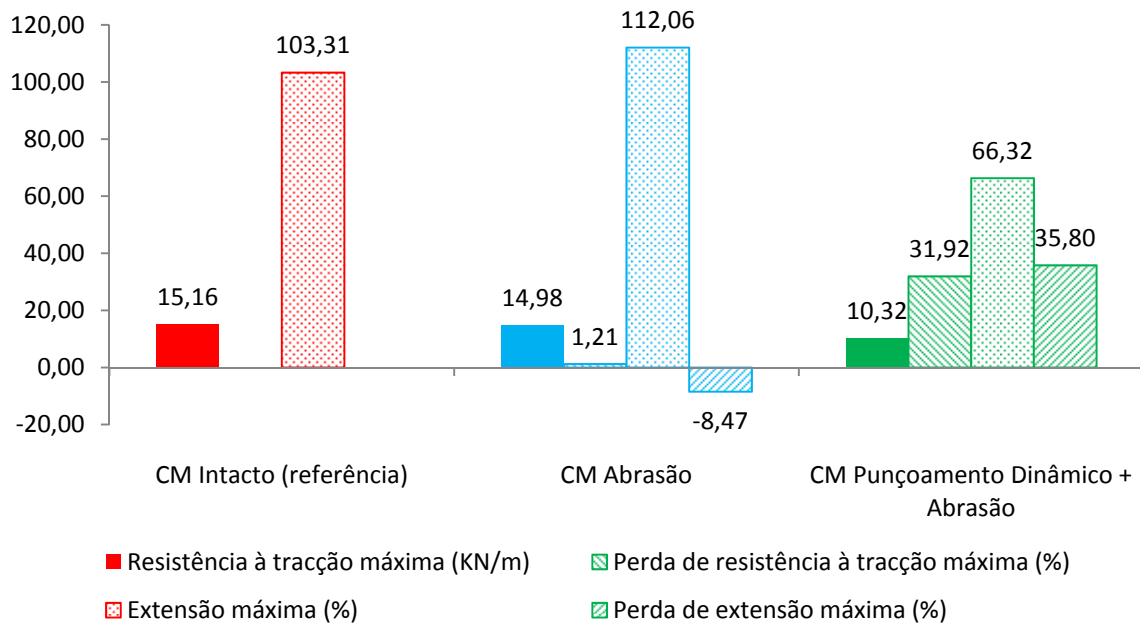



Fig. 4.21 – Resistência à tracção e extensão para a carga máxima para o material: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico

Os resultados apresentados nas Figuras 4.20 e 4.21 mostram que:

- Resistência à tracção (T) - A resistência à tracção do material sujeito à abrasão (14.98 kN/m) é muito próxima da do material intacto (15,16 kN/m), valor de referência. A perda de resistência à tracção é de 1,21% a qual demonstra que a danificação induzida pela abrasão do geocompósito em consideração, quando ensaiado na direcção perpendicular ao fabrico, é desprezável não afectando a resistência à tracção. A justificação deste comportamento, deve-se ao facto de a abrasão do material originar a reorientação de alguns dos filamentos do geotêxtil não tecido em polipropileno, o qual contribui mais significativamente para a resistência do geocompósito quando ensaiado na direcção perpendicular ao fabrico, não sendo visível qualquer danificação dos filamentos em PET (ver Figura 4.22.

a) b)

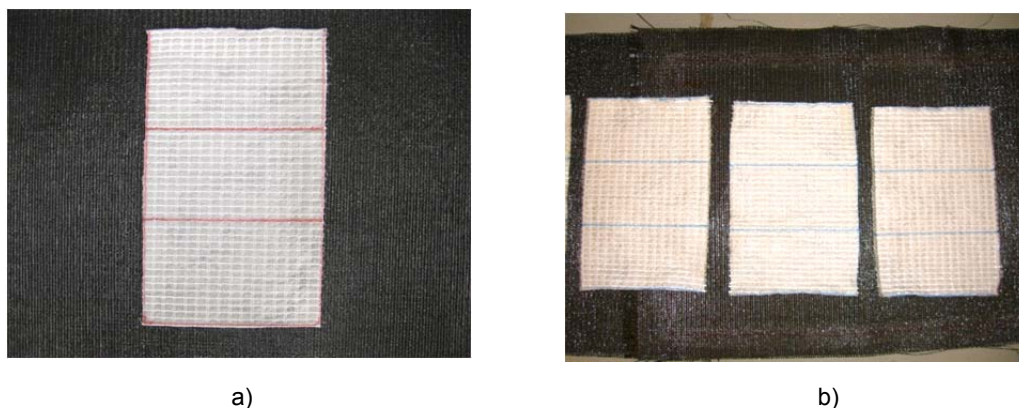



Fig. 4.22 – Provete de geocompósito GC50A PET DPF: a) Provete intacto; b) Provetes após o ensaio de abrasão.

A resistência à tracção do material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico (10,32 kN/m) é muito inferior à resistência à tracção do material intacto (15,16 kN/m), originando uma perda de resistência à tracção de 31,92%. Esta perda de resistência à tracção observada deve-se à danificação sofrida pelo geocompósito durante o punçoamento dinâmico. De facto, o punçoamento dinâmico provoca um orifício no geotêxtil não tecido em polipropileno, originando um ponto de fragilidade na estrutura do mesmo, por onde se inicia a rotura do geocompósito (ver Figura 4.23).

a) b)

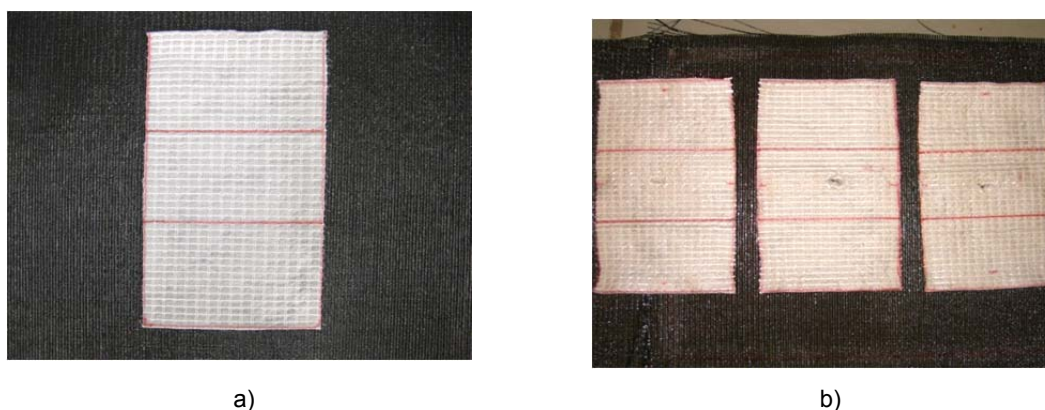



Fig. 4.23 – Provete de geocompósito GC50PA PET DPF: a) Provete intacto; b) Provetes após o ensaio de abrasão precedido de punçoamento dinâmico.

Em conclusão, poder-se-á dizer que a danificação do geocompósito originada pela abrasão precedida de punçoamento dinâmico é mais gravosa em termos de perda de resistência à tracção, do que a danificação induzida apenas pela abrasão, já que neste último caso a danificação originada no material é praticamente inexistente.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – A extensão na carga máxima do material sujeito à abrasão (112,06%) é superior ao valor do mesmo parâmetro para o material intacto (103,31%), valor de referência, sendo a perda de extensão na carga máxima de -8,47%. Este comportamento pode ser explicado pela reorientação dos filamentos do geotêxtil não tecido em polipropileno, o que pode originar um comportamento mais dúctil do geocompósito.

A extensão na carga máxima do material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico (66,32%) é muito inferior ao valor do mesmo parâmetro para o material intacto (103,31%), o que representa uma perda de extensão para a carga máxima de 35,80%. Esta diminuição da extensão para a carga máxima é devida à danificação induzida no geotêxtil não tecido em polipropileno, pelo ensaio de punçoamento dinâmico o qual origina um orifício no mesmo criando um ponto de fragilidade que impede que a extensão máxima do geotêxtil não tecido seja totalmente mobilizada, visto que a rotura do provete se inicia pelo orifício.

A danificação originada pela abrasão precedida de punçoamento dinâmico origina uma perda de extensão para a carga máxima, contrariamente à danificação induzida apenas pela abrasão a qual reflecte um aumento da extensão para a carga. De referir que o aumento da extensão para a carga máxima resultante da abrasão do material é menos significativa, em termos quantitativos, do que a redução da mesma extensão devida à abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores da rigidez secante para 2%; 5%; 10%; ε_{Fmax}, do material intacto, danificado por abrasão e danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico são apresentados na Figura 4.24.

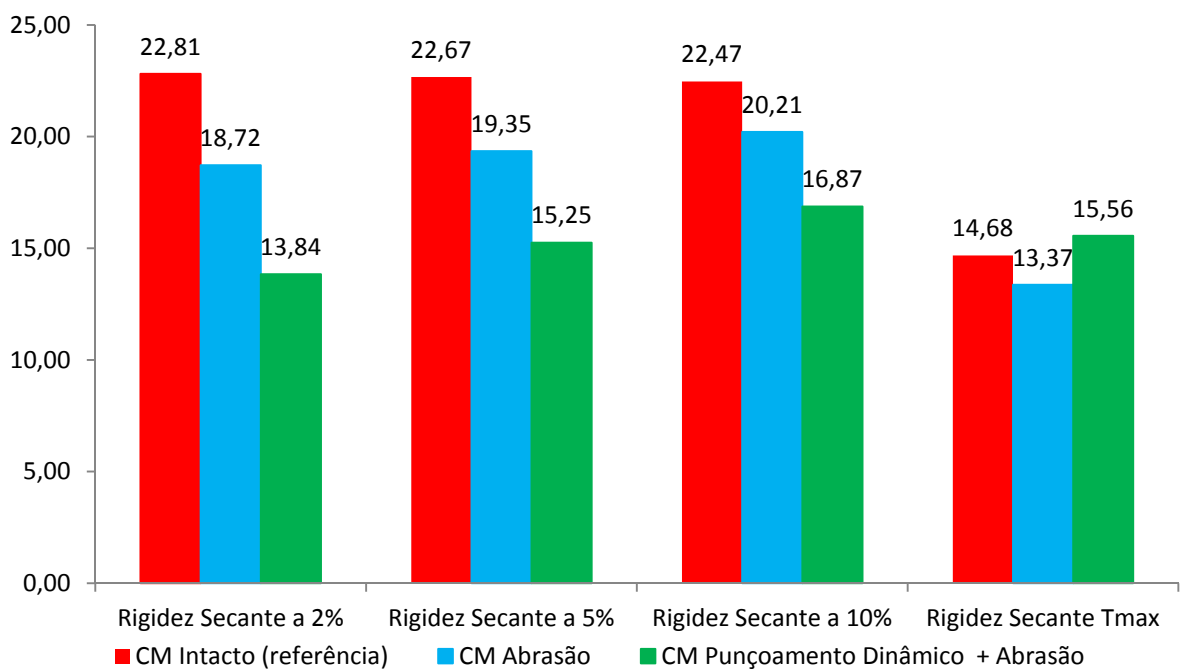



Fig. 4.24 – Rigidez secante para as extensões de 2%; 5%; 10%; ε_{Fmax} para os provetes ensaiados: intactos, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

As rigidezes secantes a 2%; 5% e 10% do material danificado por abrasão são menores do que as correspondentes do material intacto. O mesmo acontece para o material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico, porém, neste último caso a redução é mais significativa.

A variação da rigidez secante ε_{Fmax} com a danificação é pouco significativa.

- Robustez – os valores da robustez do material intacto, danificado por abrasão e danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico são apresentados na Figura 4.25

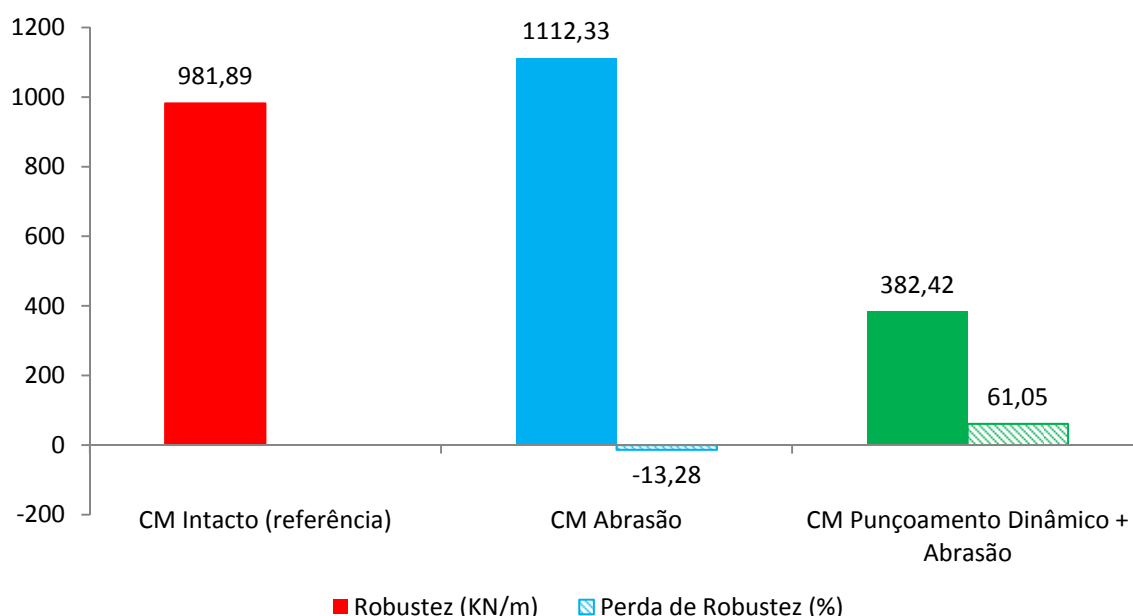



Fig. 4.25 – Robustez para o material: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

O valor da robustez do material sujeito à abrasão (1112,33kN/m) é superior ao valor da robustez do material intacto (981,89kN/m), valor de referência, sendo a perda de robustez de -13,28%.

A robustez do material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico (382,42 kN/m) é inferior à do material intacto, o que significa uma perda de robustez de 61,05%.

No material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico a robustez diminui, conferindo ao geocompósito um comportamento flexível. Por seu turno, no material danificado apenas por abrasão a robustez aumenta, mantendo-se o comportamento do geocompósito danificado idêntico ao do intacto, isto é, flexível e robusto.

Refira-se que a robustez reflecte o comportamento deste geocompósito noutras grandezas já abordadas, como a resistência à tracção e a extensão para a carga máxima.

4.6.1.2. Geocompósito GC50 – Direcção de Fabrico (DF)

No gráfico força-extensão da Figura 4.26 apresentam-se os resultados das curvas médias obtidas nos ensaios do geocompósito GC50 na direcção de fabrico. Para efeitos de comparação é também apresentada a curva média obtida no ensaio dos provetes intactos.

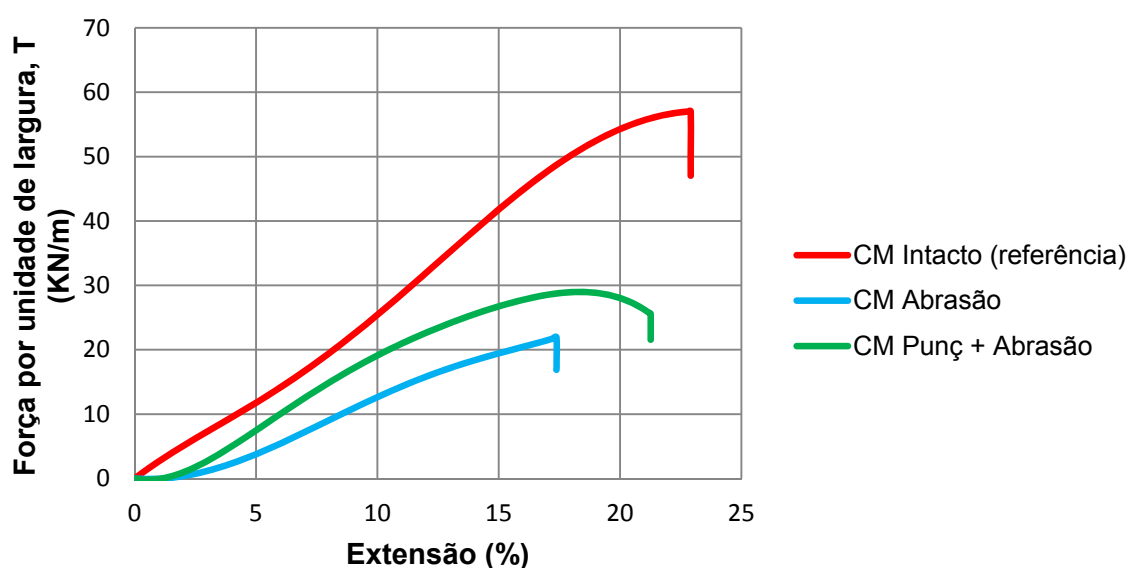



Fig. 4.26 – Curvas médias de força-extensão para o material: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico

Na Figura 4.27 compara-se a resistência à tracção e a respectiva perda de resistência à tracção, bem como a extensão para a carga máxima e a correspondente perda de extensão para a carga máxima, considerando o material intacto, sujeito à abrasão e sujeito à abrasão após punçoamento dinâmico.

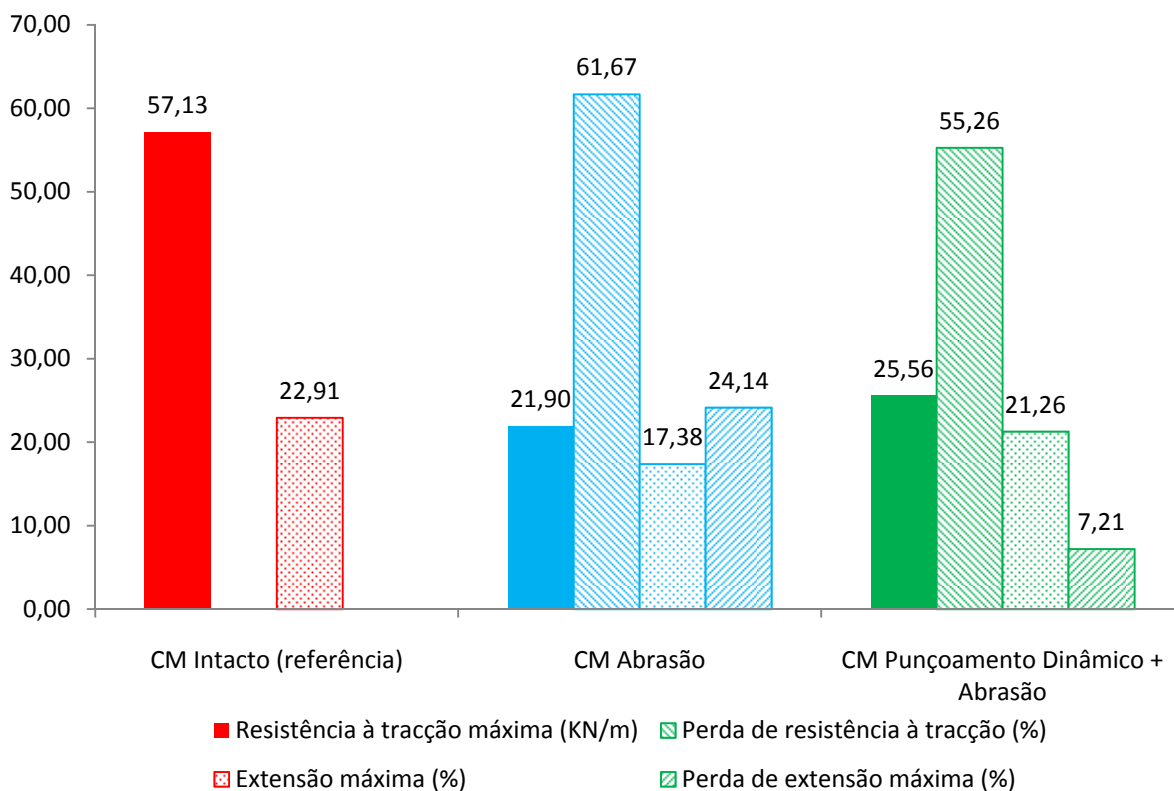



Fig. 4.27 – Resistência à tracção e extensão para a carga máxima para o material: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico

Considerando as informações constantes nas Figuras 4.26 e 4.27 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) - A resistência à tracção do material sujeito à abrasão (21,90 kN/m) é muito menor do que a resistência à tracção do material intacto (57,13 kN/m), valor de referência. A perda de resistência à tracção é de 61,67%. A justificação deste comportamento, deve-se ao facto de a abrasão do material na direcção de fabrico induzir desgaste evidente nos filamentos de PET (ver Figura 4.28), os quais são os principais responsáveis pela resistência à tracção do geocompósito nessa direcção.

a)

b)

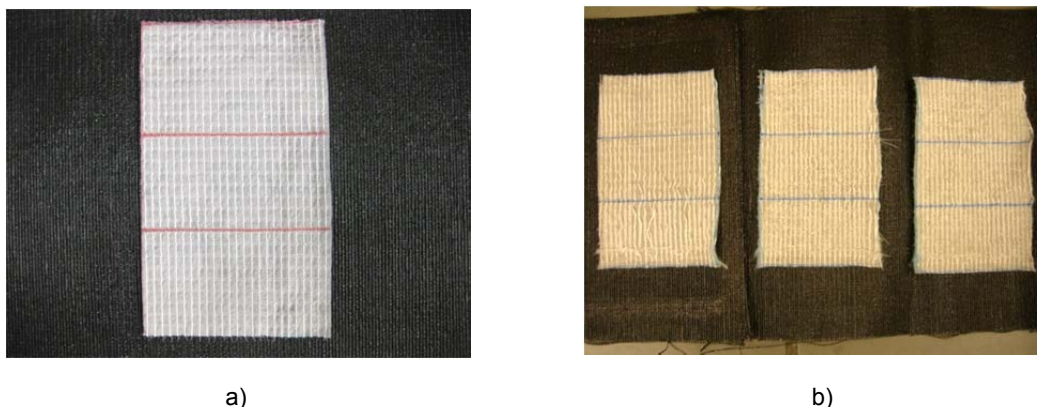



Fig. 4.28 – Provete de geocompósito GC50A PET DF: a) Provete intacto; b) Provetes após o ensaio de abrasão.

A resistência à tracção do material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico (25,56 kN/m) é também muito inferior ao valor da curva média do material intacto (57,13 kN/m), originando uma perda de resistência à tracção de 55,26%. A justificação desta perda de resistência é idêntica à dada para a danificação do material apenas por abrasão (Ver Figura 4.29).

a)

b)

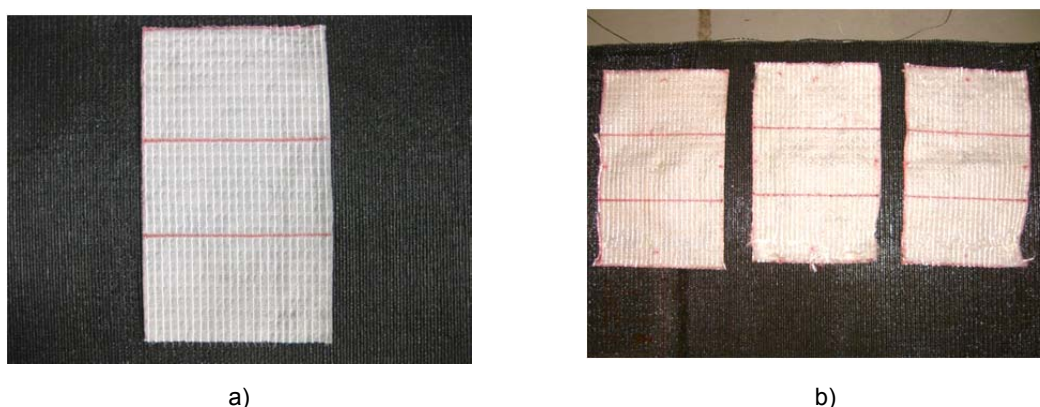



Fig. 4.29 – Provete de geocompósito GC50PA PET DF: a) Provete intacto; b) Provetes após o ensaio de abrasão precedido de punçoamento dinâmico.

Verifica-se que a perda de resistência à tracção é maior no material danificado apenas por abrasão, isto porque, o orifício criado no geocompósito pelo punçoamento dinâmico aumenta a deformabilidade do material durante a abrasão, reduzindo a eficácia do contacto dos

filamentos em PET com a película abrasiva e consequentemente diminuindo os danos nestes filamentos.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – A extensão para a carga máxima do material intacto é de 22,91%. No caso do material sujeito à abrasão o valor desse parâmetro desce para 17,38%, o que representa uma perda de extensão na carga máxima de 24,14%. Este comportamento resulta, quer da danificação dos filamentos de poliéster durante o ensaio de abrasão, quer do uso de esticador durante a indução de abrasão, o qual leva à mobilização da extensão do geocompósito ainda durante a danificação.

  O valor da extensão para a carga máxima do material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico (21,26%) é ligeiramente inferior ao valor de referência, sendo a perda de extensão para a carga máxima de 7,21%.

  Observa-se que a danificação por abrasão é mais gravosa do que a danificação por abrasão precedida de punçoamento dinâmico, sendo a justificação a mesma referida para a resistência à tracção.

  Observa-se, também, que este geocompósito solicitado na direcção de fabrico tem um comportamento quase exclusivamente dependente dos filamentos de poliéster, uma vez que ao cederem estes filamentos a rotura do geossintético inicia-se de imediato. Ainda por este motivo é que o comportamento do geocompósito quando solicitado na direcção de fabrico é completamente distinto do observado quando é solicitado na direcção perpendicular à anterior.

- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores da rigidez secante para 2%; 5%; 10%; ε_{Fmax}, do material intacto, danificado por abrasão e danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico são apresentados na Figura 4.30.

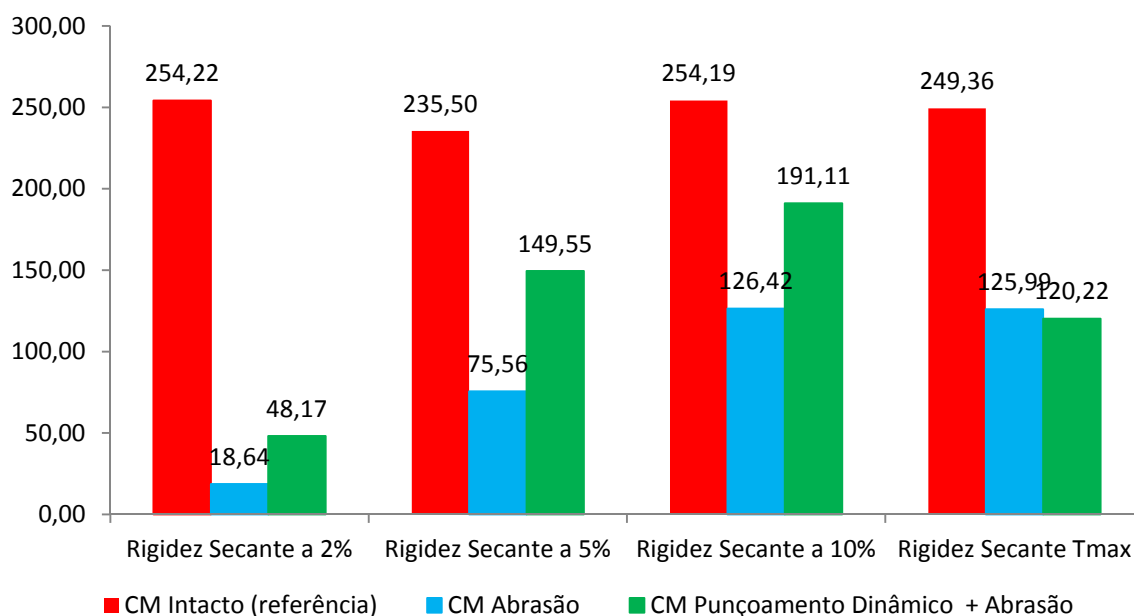



Fig. 4.30 – Rigidez secante para as extensões de 2%; 5%; 10%; ε_{Fmax} para os materiais: intactos, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

As rigidezes secantes a 2%; 5% e 10% do material danificado por abrasão são bastante menores do que as correspondentes do material intacto. Para o material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico observa-se também uma redução das rigidezes secantes em causa em relação às do material intacto, embora menos acentuada do que na danificação por abrasão.

O valor da rigidez secante ε_{Fmax} é idêntico para os dois tipos de danificação em consideração, mas bastante diferente do observado para o material intacto.

- Robustez – Os valores da robustez do material intacto, danificado por abrasão e danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico são apresentados na Figura 4.31.

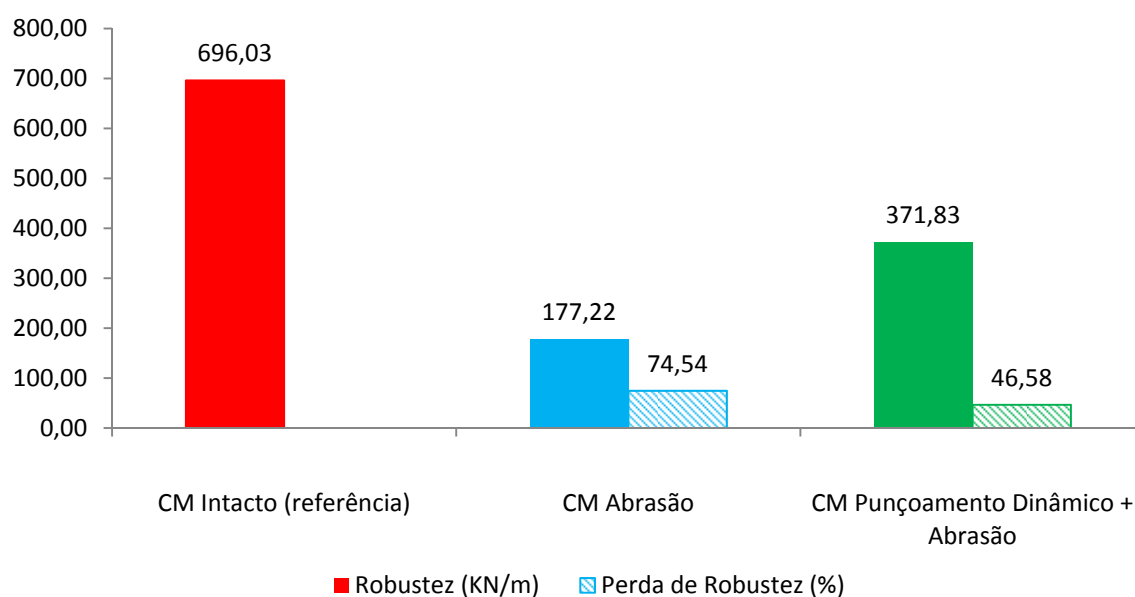



Fig. 4.31 – Robustez para o material: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

O valor da robustez do material sujeito à abrasão (177,22 kN/m) é inferior à do material intacto (696,03 kN/m), sendo a perda de robustez de 74,54%.

A robustez do material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico (371,83 kN/m) é também inferior à do material intacto, sendo a perda de robustez de 46,58%.

Para ambas as danificações há redução de robustez, embora essa redução seja mais significativa para a danificação apenas por abrasão. Ao contrário do que acontece com o material intacto que exibe um comportamento rígido e frágil, o material danificado, quer por abrasão, quer por abrasão precedida de punçoamento dinâmico apresenta comportamento flexível.

Refira-se que a robustez reflecte o comportamento deste geocompósito noutras grandezas já abordadas, como a resistência à tracção e a extensão para a carga máxima

4.6.1.3. Geocompósito GC100 – Direcção Perpendicular à de Fabrico (DPF)

No gráfico força-extensão da Figura 4.32 apresentam-se os resultados das curvas médias obtidas nos ensaios do geocompósito GC100 na direcção perpendicular à de fabrico. Para efeitos de comparação é também apresentada a curva média obtida no ensaio dos provetes intactos.

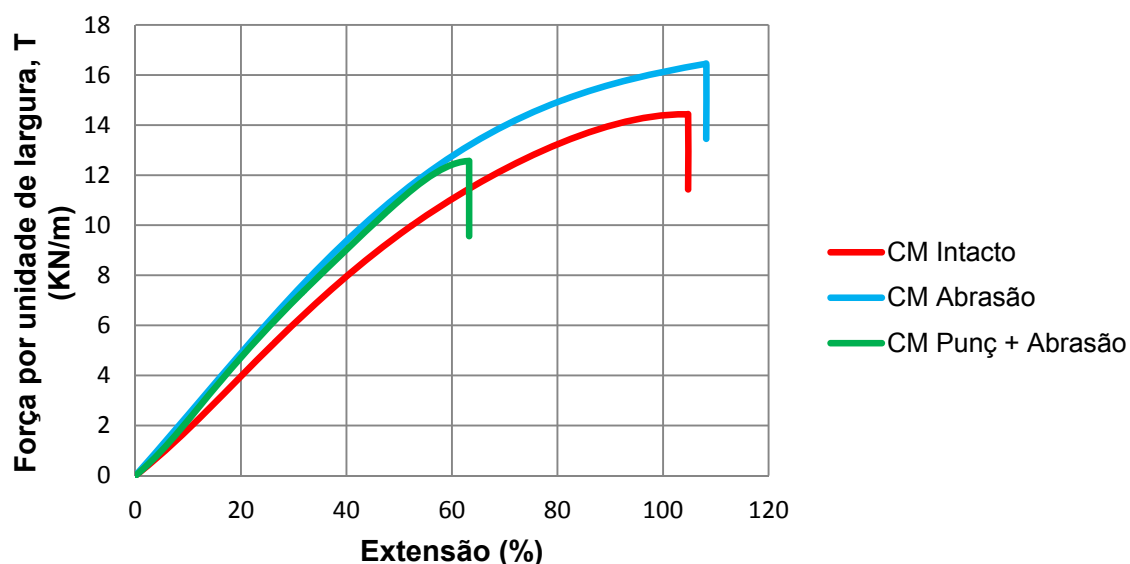



Fig. 4.32 – Curvas médias de força-extensão para o material: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico

Na Figura 4.33 compara-se a resistência à tracção e a respectiva perda de resistência à tracção, bem como a extensão para a carga máxima e a correspondente perda de extensão para a carga máxima, considerando o material intacto, sujeito à abrasão e sujeito à abrasão após punçoamento dinâmico

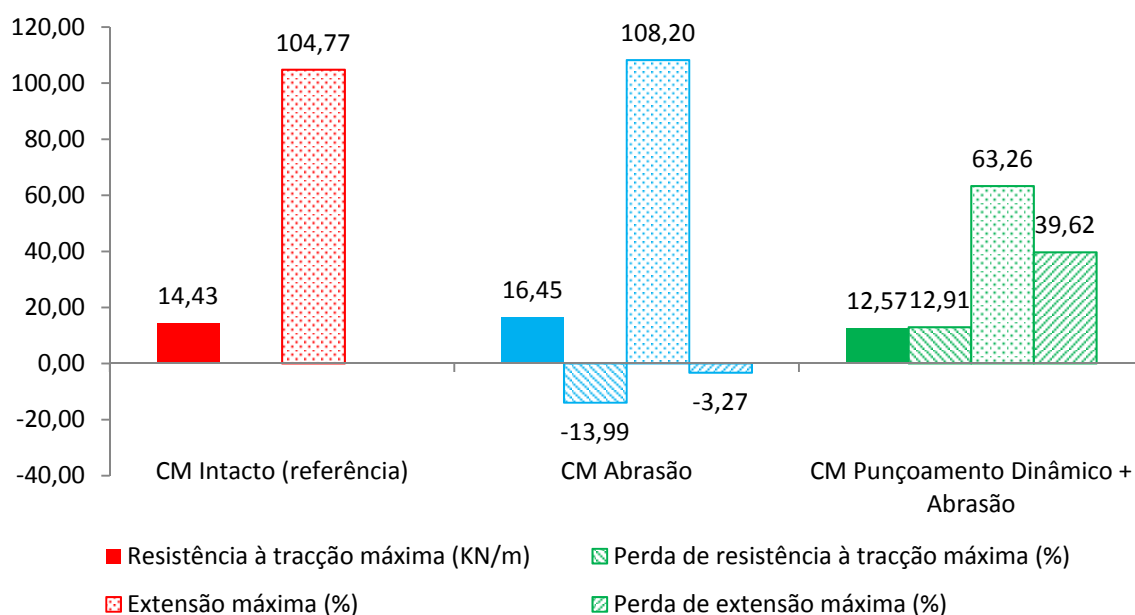



Fig. 4.33 – Resistência à tracção e extensão para a carga máxima para o material: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico

Os resultados apresentados nas Figuras 4.32 e 4.33 mostram que:

- Resistência à tracção (T) - A resistência à tracção do material sujeito à abrasão (16,45 kN/m) é maior do que a resistência à tracção do material intacto (14,43 kN/m). A perda de resistência à tracção é de -13,99%. A justificação deste comportamento, deve-se ao facto de a abrasão do material originar a reorientação de alguns dos filamentos do geotêxtil não tecido em polipropileno, o qual contribui mais significativamente para a resistência do geocompósito quando ensaiado na direcção perpendicular ao fabrico, não sendo visível qualquer danificação dos filamentos em PET (ver Figura 4.34).

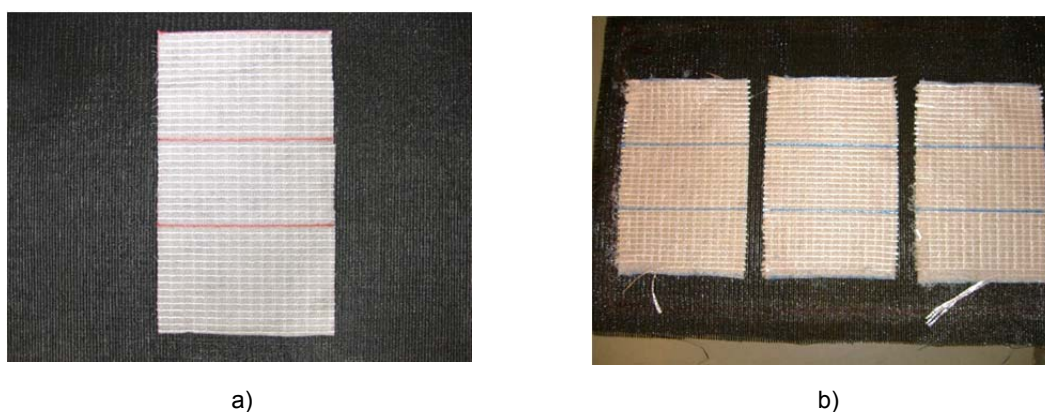



Fig. 4.34 – Provete de geocompósito GC100A PET DPF: a) Provete intacto; b) Provetes após o ensaio de abrasão.

A resistência à tracção do material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico (12,57 kN/m) é inferior à resistência à tracção do material intacto (14,43 kN/m), sendo a perda de resistência à tracção de 12,91%. Esta perda de resistência à tracção observada deve-se à danificação sofrida pelo geocompósito durante o punçoamento dinâmico.

De facto, o punçoamento dinâmico provoca um orifício no geotêxtil não tecido em polipropileno, originando um ponto de fragilidade na estrutura do mesmo, por onde se inicia a rotura do geocompósito (ver Figura 4.35).

a)

b)

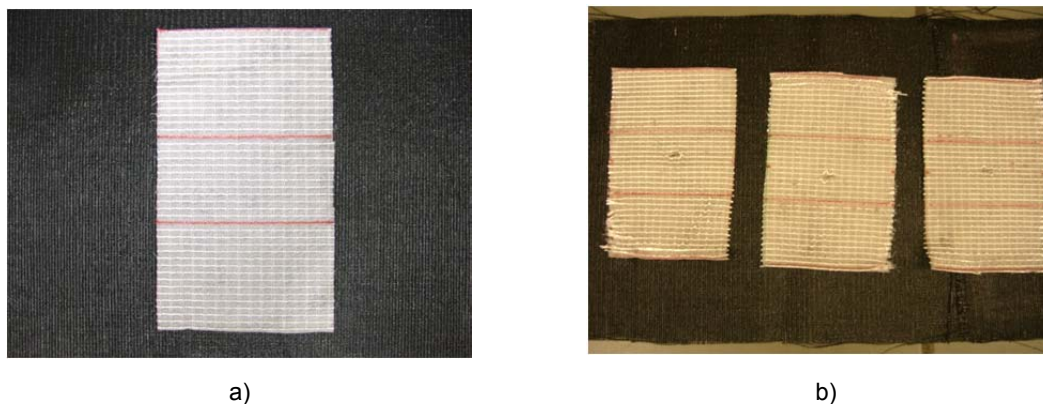



Fig. 4.35 – Provete de geocompósito GC100PA PET DPF: a) Provete intacto; b) Provetes após o ensaio de abrasão precedido de punçoamento dinâmico.

Observa-se que a danificação do geocompósito originada pela abrasão precedida de punçoamento dinâmico é mais gravosa em termos de perda de resistência à tracção, do que a danificação induzida apenas pela abrasão, já que neste último caso há mesmo um aumento da resistência à tracção, embora não relevante.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – A extensão na carga máxima do material sujeito à abrasão (108,20%) é superior ao valor do mesmo parâmetro para o material intacto (104,77%), sendo a perda de extensão na carga máxima de -3,27%. Este comportamento pode ser explicado pela reorientação dos filamentos do geotêxtil não tecido em polipropileno, o que pode originar um comportamento mais dúctil do geocompósito.

  A extensão na carga máxima do material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico (63,26%) é muito inferior ao valor do mesmo parâmetro para o material intacto (104,77%), o que representa uma perda de extensão para a carga máxima de 39,62%. Esta diminuição da extensão para a carga máxima é devida à danificação induzida no geotêxtil não tecido em polipropileno, pelo ensaio de punçoamento dinâmico o qual origina um orifício no mesmo criando um ponto de fragilidade que impede que a extensão máxima do geotêxtil não tecido seja totalmente mobilizada, visto que a rotura do provete se inicia pelo orifício.

  As danificações do geocompósito consideradas originam comportamentos distintos em termos de extensão para a carga máxima, já que a danificação por abrasão induz um ligeiro aumento do parâmetro em análise e a danificação precedida por punçoamento dinâmico provoca uma redução significativa da extensão para a carga máxima.

- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores da rigidez secante para 2%; 5%; 10%; ε_{Fmax}, do material intacto, danificado por abrasão e danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico são apresentados na Figura 4.36.

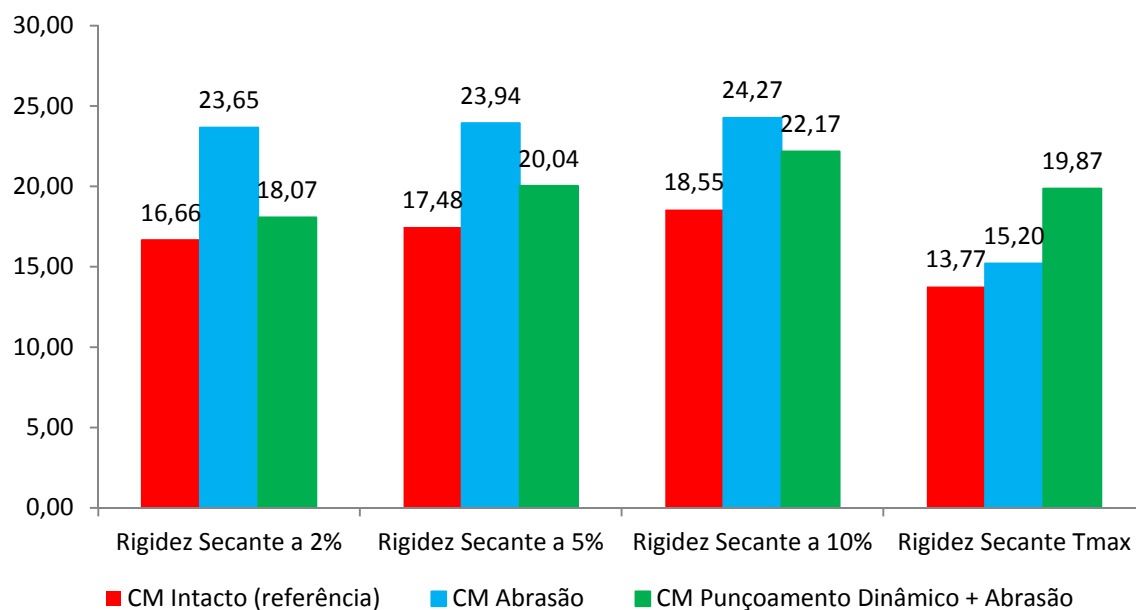



Fig. 4.36 – Rigidez secante para as extensões de 2%; 5%; 10%; ε_{Fmax} para os provetes ensaiados: intactos, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

As rigidezes secantes a 2%; 5% e 10% do material danificado por abrasão são maiores do que as correspondentes do material intacto. O mesmo acontece para o material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico, porém, neste último caso o acréscimo é menos significativo.

Também a rigidez secante ε_{Fmax} aumenta com a danificação, sendo esse aumento mais significativo quando o material é danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

- Robustez – Os valores da robustez do material intacto, danificado por abrasão e danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico são apresentados na Figura 4.37.

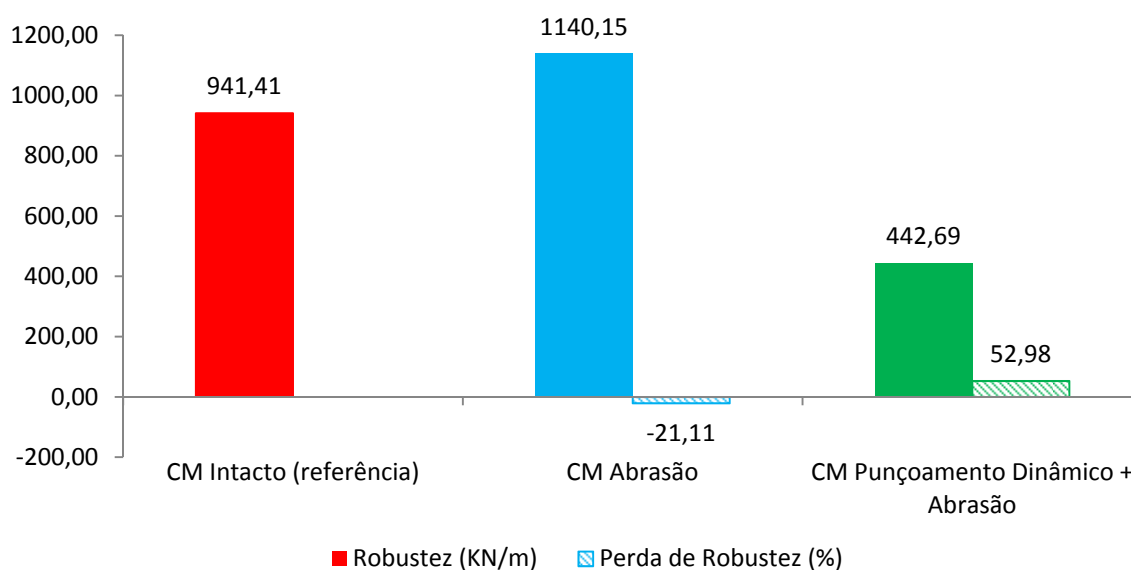



Fig. 4.37 – Robustez para o material: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

O valor da robustez do material sujeito à abrasão (1140,15 kN/m) é superior ao valor da robustez do material intacto (941,41 kN/m), sendo a perda de robustez de -21,11 %.

A robustez do material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico (442,69 kN/m) é inferior à do material intacto, o que significa uma perda de robustez de 52,98%.

No material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico a robustez diminui, conferindo ao geocompósito um comportamento flexível. Por seu turno, no material danificado apenas por abrasão a robustez aumenta, mantendo-se o comportamento do geocompósito danificado idêntico ao do intacto, isto é, flexível e robusto.

Mais uma vez, refira-se que a robustez reflecte o comportamento deste geocompósito noutras grandezas já abordadas, como a resistência à tracção e a extensão para a carga máxima.

4.6.1.4. Geocompósito GC100 – Direcção de Fabrico (DF)

No gráfico força-extensão da Figura 4.38 apresentam-se os resultados das curvas médias obtidas nos ensaios do geocompósito GC100 na direcção de fabrico. Para efeitos de comparação é também apresentada a curva média obtida no ensaio dos provetes intactos.

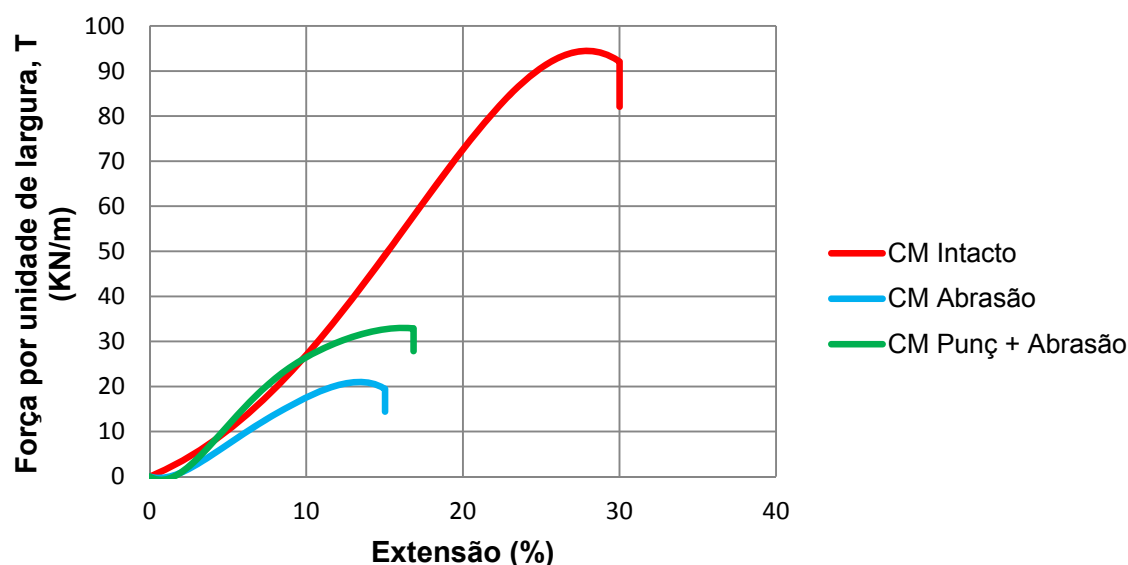



Fig. 4.38 – Curvas médias de força-extensão para o material: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico

Na Figura 4.39 compara-se a resistência à tracção e a respectiva perda de resistência à tracção, bem como a extensão para a carga máxima e a correspondente perda de extensão para a carga máxima, considerando o material intacto, sujeito à abrasão e sujeito à abrasão após punçoamento dinâmico.

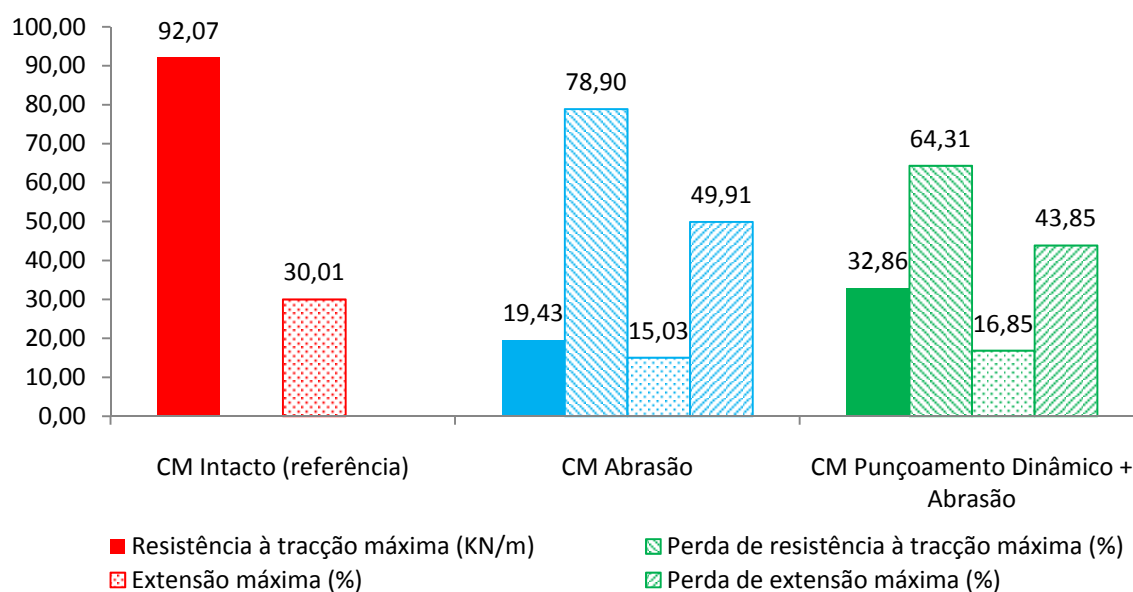
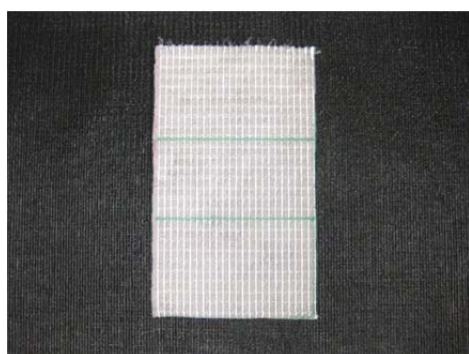



Fig. 4.39 – Resistência à tracção e extensão para a carga máxima para o material: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

Com base nas informações constantes nas Figuras 4.38 e 4.39 conclui-se que:

- Resistência à tracção (T) - A resistência à tracção do material sujeito à abrasão (19,43 kN/m) é muito inferior ao valor da resistência à tracção do material intacto (92,07 kN/m), sendo a perda de resistência à tracção é de 78,90%. A justificação deste comportamento, deve-se ao facto de a abrasão do material na direcção de fabrico induzir desgaste evidente nos filamentos de PET (ver Figura 4.40), os quais são os principais responsáveis pela resistência à tracção do geocompósito nessa direcção.

a)

b)

Fig. 4.40 – Provete de geocompósito GC100A PET DF: a) Provete intacto; b) Provetes após o ensaio de abrasão.

A resistência à tracção do material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico (32,86 kN/m) é também muito inferior (embora menos do que no caso da danificação apenas por abrasão) ao valor da resistência à tracção do material intacto (92,07

kN/m), originando uma perda de resistência à tracção de 64,31%. A justificação desta perda de resistência é idêntica à dada para a danificação do material apenas por abrasão (Ver Figura 4.41).

a) b)

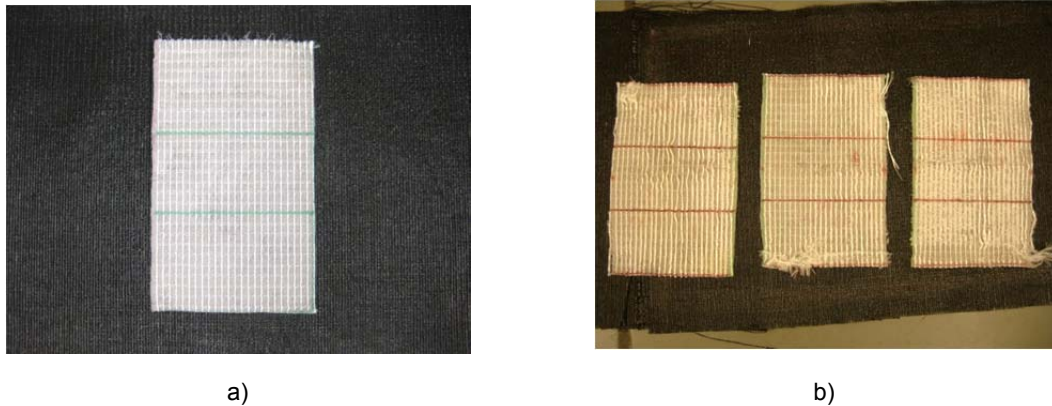



Fig. 4.41 – Provete de geocompósito GC100PA PET DF: a) Provete intacto; b) Provetes após o ensaio de abrasão precedido de punçoamento dinâmico.

Verifica-se que a perda de resistência à tracção é maior no material danificado apenas por abrasão, isto porque, o orifício criado no geocompósito pelo punçoamento dinâmico aumenta a deformabilidade do material durante a abrasão, reduzindo a eficácia do contacto dos filamentos em PET com a película abrasiva e consequentemente diminuindo os danos nestes filamentos.

- Extensão na carga máxima (ε_{Fmax}) – A extensão para a carga máxima do material intacto é de 30,01%. No caso do material sujeito à abrasão o valor desse parâmetro desce para 15,03%, o que representa uma perda de extensão na carga máxima de 49,91%. Este comportamento resulta, quer da danificação dos filamentos de poliéster durante o ensaio de abrasão, quer do uso de esticador durante a indução de abrasão, o qual leva à mobilização da extensão do geocompósito ainda durante a danificação.

  O valor da extensão para a carga máxima do material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico (16,85%) é também muito inferior ao valor de referência, sendo a perda de extensão para a carga máxima de 43,85%.

  Observa-se que a danificação por abrasão é ligeiramente mais gravosa do que a danificação por abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

  Observa-se, também, que este geocompósito solicitado na direcção de fabrico tem um comportamento quase exclusivamente dependente dos filamentos de poliéster, uma vez que ao cederem estes filamentos a rotura do geossintético inicia-se de imediato. Ainda por este motivo é que o comportamento do geocompósito quando solicitado na direcção de fabrico é completamente distinto do observado quando é solicitado na direcção perpendicular à anterior.

- Rigidez secante (J_{sec}) – Os valores da rigidez secante para 2%; 5%; 10%; ε_{Fmax}, do material intacto, danificado por abrasão e danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico são apresentados na Figura 4.42.

Fig. 4.42 – Rigidez secante para as extensões de 2%; 5%; 10%; ε_{Fmax} para os materiais: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

As rigidezes secantes a 2%, 5%, 10% e ε_{Fmax} do material danificado por abrasão são bastante menores do que as correspondentes do material intacto. Para o material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico observa-se também uma redução das rigidezes secantes em causa em relação às do material intacto, embora menos acentuada do que na danificação por abrasão.

- Robustez – Os valores da robustez do material intacto, danificado por abrasão e danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico são apresentados na Figura 4.43.

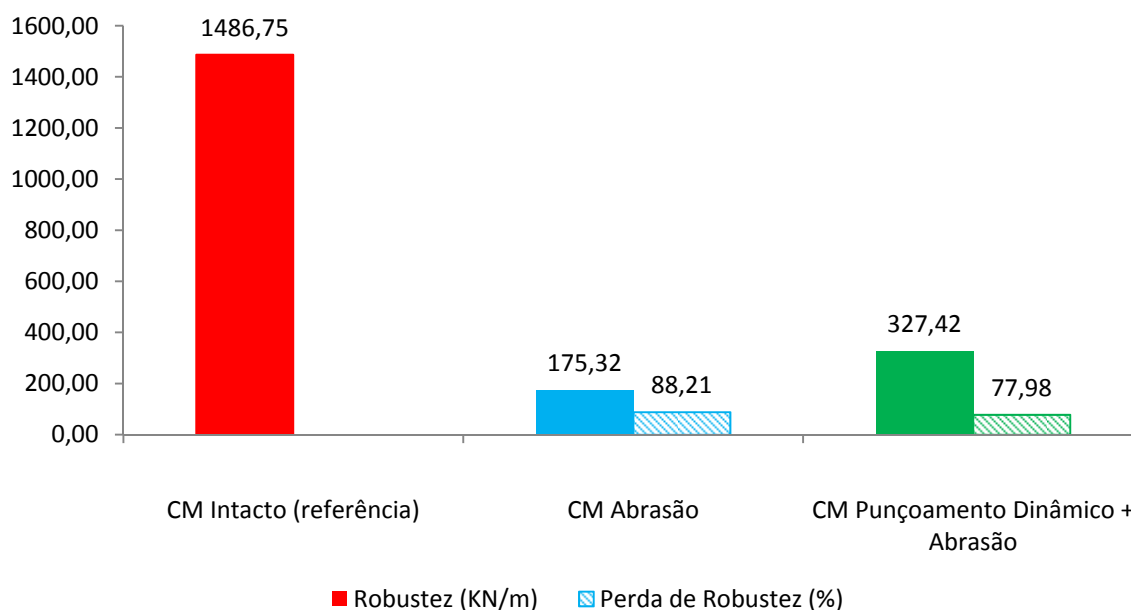



Fig. 4.43 – Robustez para o material: intacto, após abrasão, após abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

O valor da robustez do material sujeito à abrasão (175,32 kN/m) é muito inferior à do material intacto (1486,75 kN/m), sendo a perda de robustez de 88,21%.

A robustez do material danificado por abrasão precedida de punçoamento dinâmico (327,42 kN/m) é também inferior à do material intacto, sendo a perda de robustez de 77,98%.

Para ambas as danificações há redução de robustez, embora essa redução seja mais significativa para a danificação apenas por abrasão. Ao contrário do que acontece com o material intacto que exibe um comportamento rígido e frágil, o material danificado, quer por abrasão, quer por abrasão precedida de punçoamento dinâmico apresenta comportamento flexível.

Como já foi dito atrás, a robustez reflecte o comportamento deste geocompósito noutras grandezas já abordadas, como a resistência à tracção e a extensão para a carga máxima

4.7. CONCLUSÕES

Nesta secção são apresentadas as conclusões gerais dos ensaios realizados aos geocompósitos em estudo.

Os comportamentos dos geocompósitos GC 50 e GC 100 danificados por abrasão e abrasão precedida de punçoamento dinâmico, nas duas direcções de solicitação consideradas, foram comparados, respectivamente nas secções 4.4 e 4.5, com os comportamentos dos materiais intactos (valores de referência) apresentados na secção 4.3.

Na secção 4.6, para cada um dos geocompósitos, e para cada direcção de solicitação considerada, foi feita a comparação dos comportamentos dos materiais intactos, danificados por abrasão e danificados por abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

Com base na informação obtida conclui-se que ambos os geocompósitos (GC50 e GC100) apresentam comportamentos similares desde que a direcção de solicitação seja a mesma.

Assim, para a direcção perpendicular ao fabrico (DPF) tem-se:

- Os geocompósitos intactos e danificados, quer por abrasão, quer por abrasão precedida de punçoamento dinâmico apresentam valores bastante similares para a resistência à tracção, a extensão para a carga máxima e a robustez.

  Este facto resulta de, na direcção de solicitação em causa, os filamentos em PET não serem praticamente solicitados. De notar, que o geotêxtil não tecido em polipropileno é o mesmo em ambos os geocompósitos, sendo o comportamento diferenciado pelas características dos filamentos em PET.

- A danificação por abrasão tem efeito diminuto no comportamento dos geocompósitos na DPF.

- A danificação por abrasão precedida de punçoamento dinâmico conduz à diminuição da resistência à tracção e da extensão para a carga máxima em ambos os geocompósitos.

- Para ambos os geocompósitos, a danificação por abrasão conduz a valores de rigidez secante a 2%;5% e 10% maiores do que a danificação por abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

- Para ambos os geocompósitos, a rigidez secante a 2%, apresenta um elevado coeficiente de variação em relação à média dos provetes ensaiados. Para esta rigidez verificou-se também uma disparidade entre os valores obtidos pela média dos provetes e a curva média respectiva. Estas diferenças devem-se ao facto de na fase inicial do ensaio haver necessidade de ajustes no

conjunto garra/provete, que podem afectar o valor da rigidez secante a 2%,uma vez que esta é definida para uma extensão muito próxima do início do ensaio. Com efeito, à medida que a extensão para a qual a rigidez é definida aumenta diminui o coeficiente de variação do parâmetro.

- As diferenças de valores da rigidez secante a 2% são mais evidentes no GC100 do que no GC50

No que respeita à direcção de fabrico (DF) tem-se:

- Os geocompósitos intactos apresentam valores distintos de resistência à tracção, de extensão para a carga máxima e por consequência da robustez.
- A resistência à tracção dos dois geocompósitos intactos é muito diferente, pois na DF são os filamentos em PET que mais significativamente contribuem para a resistência e estes filamentos são mais resistentes no GC100 do que no GC50.
- A resistência à tracção, a extensão para a carga máxima e a robustez apresentam valores similares para ambos os geocompósitos danificados por abrasão e por abrasão precedida de punçoamento dinâmico.
- A danificação por abrasão tem uma influência significativa no comportamento dos dois geocompósitos, sendo, no entanto, maior para o GC100 (com efeito, os valores dos parâmetros do GC100 e do GC50 danificados por abrasão são idênticos).

  Esta conclusão comprova que o elemento que diferencia os comportamentos dos geocompósitos é os filamentos em PET, pois quando estes são danificados o comportamento dos dois materiais torna-se similar, já que é assegurado maioritariamente pelo geotêxtil não tecido em polipropileno que é idêntico para ambos os geocompósitos.
- A danificação por abrasão precedida de punçoamento dinâmico provoca a redução da resistência à tracção, sendo essa redução mais acentuada para o GC100.
- Em ambos os geocompósitos, a danificação por abrasão precedida de punçoamento dinâmico produz efeitos menos gravosos do que a danificação por abrasão.

  Esta conclusão resulta de, o orifício nos geocompósitos causado pelo punçoamento dinâmico reduzir a capacidade de acção abrasiva nos filamentos de PET. Com efeito, constatou-se que durante a realização do ensaio de abrasão, mesmo usando o esticador ao máximo, havia deslocamento relativo entre o geocompósito e o prato superior, o que diminuía a amplitude do movimento de vaivém do prato inferior.
- Tal como para a DPF, na DF a rigidez secante a 2%, apresenta um elevado coeficiente de variação em relação à média dos provetes ensaiados, havendo também uma disparidade entre os valores obtidos pela média dos provetes e a curva média respectiva.
- As diferenças de valores da rigidez secante a 2% são mais evidentes no GC100 do que no GC50, excepto no caso dos materiais danificados por abrasão precedida de punçoamento dinâmico.

5
DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O objectivo desta dissertação centrou-se na análise do efeito da abrasão em geossintéticos, assim como a análise do efeito conjunto (sinergia) da abrasão precedida de danificação induzida por punçoamento dinâmico.

Após os ensaios realizados e respectiva análise dos resultados fica patente a necessidade de estudos mais aprofundados com vista à quantificação do efeito do punçoamento dinâmico na abrasão.

Assim sendo, por forma a prosseguir e complementar o trabalho desenvolvido sugerem-se os seguintes estudos:

- Realização de ensaios de tracção-extensão com vista a estudar a influência do ajuste das garras na extensão na carga máxima e, consequentemente, rigidez secante e robustez;
- Estudo aprofundado do troço inicial da curva força-extensão e da sua influência nos valores da rigidez secante, com especial relevância para as extensões de 2% e 5%, para as quais se verificaram diferenças de valores significativas entre os valores obtidos pela média dos provetes e a curva média respectiva;
- Quantificação de coeficientes de redução para as degradações estudadas, actuando estas de forma isolada (abrasão) ou em conjunto (abrasão precedida de punçoamento dinâmico);
- Realização dos mesmos estudos com outros tipos de geocompósitos de reforço, de idêntica constituição (isto é, geotêxtil não tecido reforçado com filamentos de poliéster), por forma a determinar se os resultados obtidos, face às degradações impostas, podem ser generalizados a outros geocompósitos de reforço do mesmo tipo dos estudados.

Referências Bibliográficas

Carneiro, J. R. (2009). *Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental: a importância da incorporação de aditivos químicos.* Dissertação de Doutoramento em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 534p..

EN ISO 10318:2005 – Geosynthetics – Terms and definitions.

Giroud, J.P., Arman, A. e Bell, J.R. (1985). "*Geotextiles in geotechnical engineering practice and research. Report of the ISSMFE Technical Committee on Geotextiles*", Geotextiles and Geomembranes, Vol.2, p. 179-242.

Ingold, T. S. (1994). *Geotextiles and Geomembranes Manual*. Elsevier advanced Technology, Oxford, 610p.

Koerner, R. M. (1998). *Designing with Geosynthetics*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 761p.

Lopes, M. L. (1998). *Geossintéticos em engenharia civil*. Textos de apoio à disciplina Aplicação de Geossintéticos em Engenharia Civil do ramo de especialização em Materiais e Processos de Construção, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

NP EN ISO 9864:2006. *Geossintéticos. Ensaio para a determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos relacionados*, Instituto Português da Qualidade.

NP EN ISO 10319:2005. *Geotêxteis – Ensaio de tracção em tiras largas*, Instituto Português da Qualidade.

NP EN ISO 13427:2006. *Geotêxteis e produtos relacionados. Simulação do dano por abrasão*, Instituto Português da Qualidade.

NP EN ISO 13433:2008. *Geossintéticos. Ensaio de perfuração dinâmica*, Instituto Português da Qualidade.

Paula, A. M. V. (2003). "*Danificação durante a instalação – avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos*". Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Mecânica dos Solos. Universidade do Porto, FEUP, Porto, 155p.

Pinho-Lopes, M. J. F. (2004). *Estudo de coeficientes de segurança a aplicar a estruturas de controlo de erosão e de estabilização de maciços com geossintéticos*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 693p.

Pinto, A. E. S. (2005). *Aplicação de geossintéticos em linhas-férreas - Estudo laboratorial dos fenómenos de abrasão e danificação durante a instalação nos materiais*. Dissertação de Mestrado em Vias de Comunicação na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 168p.

Rosete, A.J. (2010). *Durabilidade de geossintéticos em obras ferroviárias – abrasão e DDI.* Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil – Especialização em Vias de Comunicação na Faculdade de Engenharia da Universidade de Aveiro, 114p.

Shukla, S. K. (2002). *Fundamentals of geosynthetics*, Chapter 1 of the book *Geosynthetics and their Applications*. Thomas Telford Publishing, Londres, pp.1-54.

Vieira, C. (2008). *Muros e taludes de solo reforçado com geossintéticos: comportamento sísmico e metodologias de dimensionamento*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, 575p.